



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

Análisis estructural y sistema petrolero de la cuenca
Titicaca

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Carlos Alfonso TEVES GUTIERREZ

Lima, Perú

2015



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Teves, C. (2015). *Análisis estructural y sistema petrolero de la cuenca Titicaca*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el día Miércoles 30 del mes de Setiembre del año 2015, siendo las 4:00 p.m., en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

MG. CIRO SERGIO BEDIA GUILLÉN

(Presidente de Jurado)

MG. CARLOS DEL VALLE JURADO

(Miembro de Jurado)

MG. VICTOR MANUEL URIBE CORDOVA

(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico público de colación de la Tesis de Don **CARLOS ALFONSO TEVES GUTIERREZ**, Bachiller en Ingeniería Geológica quien sustentará la Tesis titulada «ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TITICACA», para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la colación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO


El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

POR UNANIMIDAD CON LA NOTA DE DIECIOCHO (18).

Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis por el Jurado examinador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el Título Profesional de Ingeniero Geólogo a Don CARLOS ALFONSO TEVES GUTIERREZ.

Siendo las 18:00 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 30 de Setiembre del 2015


MG. CIRO SERGIO BEDIA GUILLÉN
PRESIDENTE DE JURADO


MG. CARLOS DEL VALLE JURADO
MIEMBRO DE JURADO


MG. VICTOR MANUEL URIBE CORDOVA
MIEMBRO DE JURADO

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento en estas líneas, tanto a las instituciones como a las personas que sin su apoyo no hubiera podido culminar el presente trabajo.

En primer lugar, agradecer tanto al Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) como a PERUPETRO S.A., por haber apostado en mí, para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto. Al Dr. Patrice Baby, Director de Investigación, por sus valiosas enseñanzas, su asesoramiento, su paciencia y sobretodo su amistad brindada; al Ing. Rolando Bolaños, Gerente de Exploración, por su asistencia hacia mi persona en el marco del convenio bilateral.

Seguidamente, a la MsC. Ysabel Calderón, próxima a obtener su doctorado, por su invaluable apoyo con sus conocimientos y amistad, al Ing. Elmer Martínez, Geólogo Senior, por compartir conmigo parte de su amplia experiencia profesional, así como brindarme sabios consejos, así como a todos los miembros del Grupo Funcional de Exploración. Al Grupo Funcional de Banco de Datos, representado por el Ing. Asaid Bandach, por su colaboración en el progreso de esta investigación.

A los miembros del Equipo del IRD, Christian Hurtado y Yessica Vela, por su amistad y apoyo en el desarrollo del proyecto. A mis colegas y amigos, Jimmy Cotrina, Juan Carlos Quinto, Leonardo Ramirez, entre otros; los cuales con sus consejos e ideas corroboraron a generar un mejor perfil del trabajo.

A mi casa de estudios, para el caso, representada por mis profesores y en especial mi asesor, MsC. Javier Jacay, por su desinteresada amistad así como para prestar las observaciones del caso para mejorar la presente tesis.

Finalmente, y de manera muy especial, agradecer a mi familia, novia y amigos por su impagable sostén en el transcurso de todo el presente proyecto.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, es un estudio integral de la geometría estructural, estratigrafía y potencial hidrocarburífero de la Cuenca Titicaca, basado en la información de superficie y subsuelo, recopilada y adquirida, en el desarrollo del actual proyecto.

El Altiplano es una cuenca inter-montañosa compleja estructurada por tectónica de corrimiento (Rochat et al., 1998; Rochat, 2002), con un potencial petrolífero probado como lo mostró la producción del campo Pirin (37.7 °API) en el borde septentrional del Lago Titicaca. El área de estudio, ubicada dentro del departamento de Puno, involucra el lote petrolero 105 con contrato en fuerza mayor de la empresa Antilles Oil & Gas NL, por motivos de índole social.

La Cuenca Altiplánica, en el Perú conocida como la Cuenca Titicaca, se extiende también hacia los países de Bolivia, Chile y Argentina, ha sufrido eventos geodinámicos que ha condicionado su morfología actual, siendo los más importantes los involucrados a partir del Cretáceo Superior - Paleógeno a la actualidad, con énfasis en el Eoceno, tiempo en el cual se genera la estructuración de las principales unidades morfoestructurales de la zona.

A pesar de la presencia de *seeps* de hidrocarburos en el área, que certifica la presencia de un sistema petrolero activo; el análisis estratigráfico y estructural ha tenido serias deficiencias, lo que dificulta la comprensión integral del sector. Por tal motivo, se fijó generar una sección estructural, y validarla con el método de balanceo de secciones para poder reconstituir las etapas de deformación asociadas, así como poder definir la distribución lito-estratigráfica, a partir de una adecuada correlación mostrada en el presente trabajo.

A partir de los contrastes de los resultados obtenidos, se ha podido definir principalmente dos sistemas petroleros, uno asociado al yacimiento prolífero Pirin, Ene - Ene (.), así como el Muni – Huancané (.) el cual amerita mayor revisión, relacionado al borde oriental de la cuenca.

Finalmente, el objeto final de este trabajo es optar el título profesional de Ingeniero Geólogo en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), siendo financiado por el convenio bilateral PERUPETRO-IRD.

ÍNDICE

RESUMEN

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES	1
1.1.1. Ubicación y Extensión	1
1.1.2. Accesibilidad	3
1.1.3. Geomorfología	4
1.1.4. Principales elementos climáticos	5
1.2. HISTORIA DE LAS ACTIVIDADES PETROLERAS EN EL ALTIPLANO	7
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.4. OBJETIVOS	8
1.5. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	9
1.5.1. Adquisición e Integración de Información de Superficie	9
1.5.2. Manejo de Imágenes Landsat y DEM	10
1.5.3. Construcción e Interpretación de secciones sísmicas y datos de pozo.....	10
1.5.4. Elaboración de una nueva propuesta de modelo litoestratigráfico	10
1.5.5. Conversión Tiempo - Profundidad	10
1.5.6. Construcción de secciones estructurales balanceadas	11
1.5.7. Modelado de Sistema Petrolero	12

CAPÍTULO II. TRABAJOS PREVIOS: CONTEXTO GEODINÁMICO, ESTRATIGRAFÍA Y MODELOS ESTRUCTURALES

2.1. LOS ANDES CENTRALES.....	13
-------------------------------	----

2.1.1. Generalidades	13
2.1.2. Unidades Morfoestructurales	14
2.1.3. Evolución Geodinámica	16
2.2. EL ALTIPLANO SUR PERUANO	20
2.2.1. Estratigrafía Regional.....	20
2.2.2. Modelos estructurales	33

CAPÍTULO III. REVISIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LA CUENCA TITICACA

3.1. INTRODUCCIÓN	38
3.2. DATOS DE CAMPO	38
3.2.1. Recopilación De Campañas De Campo Precedentes	38
3.2.2. Fieldtrip 2014: IRD - YPFB	41
3.3. DATOS DE SUBSUELO	54
3.3.1. Pozo Ayabacas 1X	55
3.3.2. Pozo Coata 1X	57
3.3.3. Pozo RH - 1	60
3.4. NUEVO MODELO ESTRATIGRÁFICO	64
3.4.1. Columna Estratigráfica Generalizada	64
3.4.2. Correlaciones Estratigráficas Pozos - Afloramientos	65
3.5. NUEVO DIAGRAMA LITOSTRATIGRÁFICO PROPUESTO	68

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CUENCA TITICACA

4.1. GENERALIDADES	74
4.1.1. Fajas Plegadas y Corridas	75
4.2. ANÁLISIS DE SUPERFICIE	80

4.2.1. Análisis de Imágenes Landsat y Mapas de Elevación Digital	81
4.2.2. Análisis del Mapa Geológico	83
4.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA Y DE POZOS	87
4.4. SECCIÓN BALANCEADA REGIONAL	92
4.4.1. Construcción de la Sección Estructural	92
4.4.2. Sección Balanceada Regional	98

CAPÍTULO V. SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TITICACA

5.1. GENERALIDADES	109
5.1.1. El Sistema Petrolero	110
5.2. SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TITICACA	112
5.2.1. Sistema Petrolero del Borde Occidental	114
5.2.2. Sistema Petrolero del Borde Oriental	124
5.3. NUEVOS PLAYS DE EXPLORACION	129

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES	133
6.2. RECOMENDACIONES	134

CAPÍTULO VII. BIBLIOGRAFÍA.....135

CAPÍTULO VIII. ANEXOS

8.1. LISTA DE FIGURAS.....	143
8.2. LISTA DE FOTOS	149
8.3. LISTA DE ANEXOS	150
8.4. LISTA DE TABLAS	159

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES	1
1.1.1. Ubicación y Extensión	1
1.1.2. Accesibilidad	3
1.1.3. Geomorfología	4
1.1.4. Principales elementos climáticos	5
1.2. HISTORIA DE LAS ACTIVIDADES PETROLERAS EN EL ALTIPLANO	7
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.4. OBJETIVOS	8
1.5. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	9
1.5.1. Adquisición e Integración de Información de Superficie	9
1.5.2. Manejo de Imágenes Landsat y DEM	10
1.5.3. Construcción e Interpretación de secciones sísmicas y datos de pozo	10
1.5.4. Elaboración de una nueva propuesta de modelo litoestratigráfico	10
1.5.5. Conversión Tiempo - Profundidad	10
1.5.6. Construcción de secciones estructurales balanceadas	11
1.5.7. Modelado de Sistema Petrolero	12

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

1.1.1. Ubicación y Extensión

La Cuenca Titicaca se dispone con una orientación NO/SE entre las Cordilleras Oriental y Occidental (Fig. 1). Se extiende desde el Altiplano de Puno (Frontera con Bolivia) hacia el Norte con el Altiplano de Cuzco y Apurímac, cubriendo un área de aproximadamente 500 km de longitud y 100 km de ancho, con altitudes promedio entre los 3500 m y 5000 m.

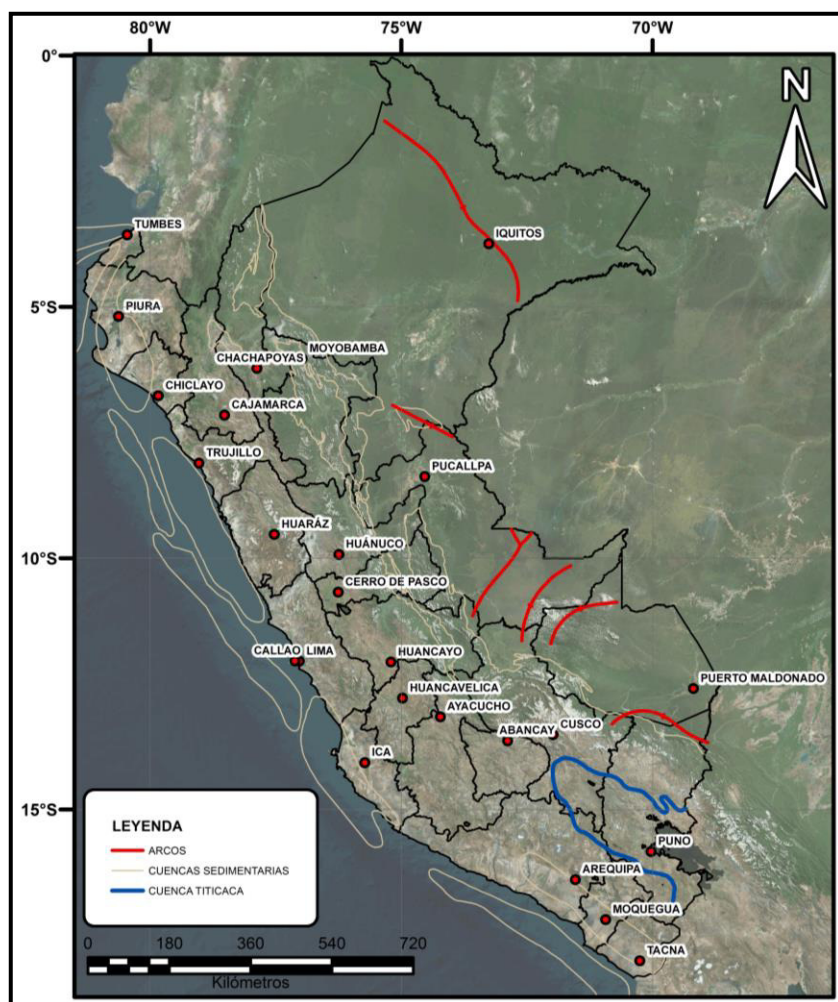


Fig. 1. Ubicación y Extensión de la Cuenca Titicaca.

La ubicación del área de trabajo se encuentra al sudeste de la Cuenca Titicaca (Fig. 2), con una extensión aproximada de 20 000 km²; abarcando el Lote 105, perteneciente actualmente a la empresa operadora Antilles Oil & Gas NL. Dentro del área de estudio, se encuentran las reservas nacionales del Titicaca de Ramis y Puno así como la Reserva Paisajística del Cerro Khapia, abarcando un área de 70 300 km², 291 500 km² y 183 140 km² respectivamente (Fig. 3).

El sistema hidrográfico de la cuenca endorreica del Titicaca, está constituido por alrededor de 864 lagos y/o lagunas, siendo los más representativos el Lago Titicaca y el Lago Arapa, que junto al lago Poopó en Bolivia formaban, el gran lago Ballivián del altiplano peruano-boliviano. A su vez consta de 12 ríos principales, de los cuales el Huancané, Ramis y Coata son los más relevantes.

Las unidades geomorfológicas presentes en la cuenca, son las llanuras y depresiones, los depósitos de vertiente, las colinas, la presencia de mesetas volcánicas, las montañas, y las superficies de agua principalmente.

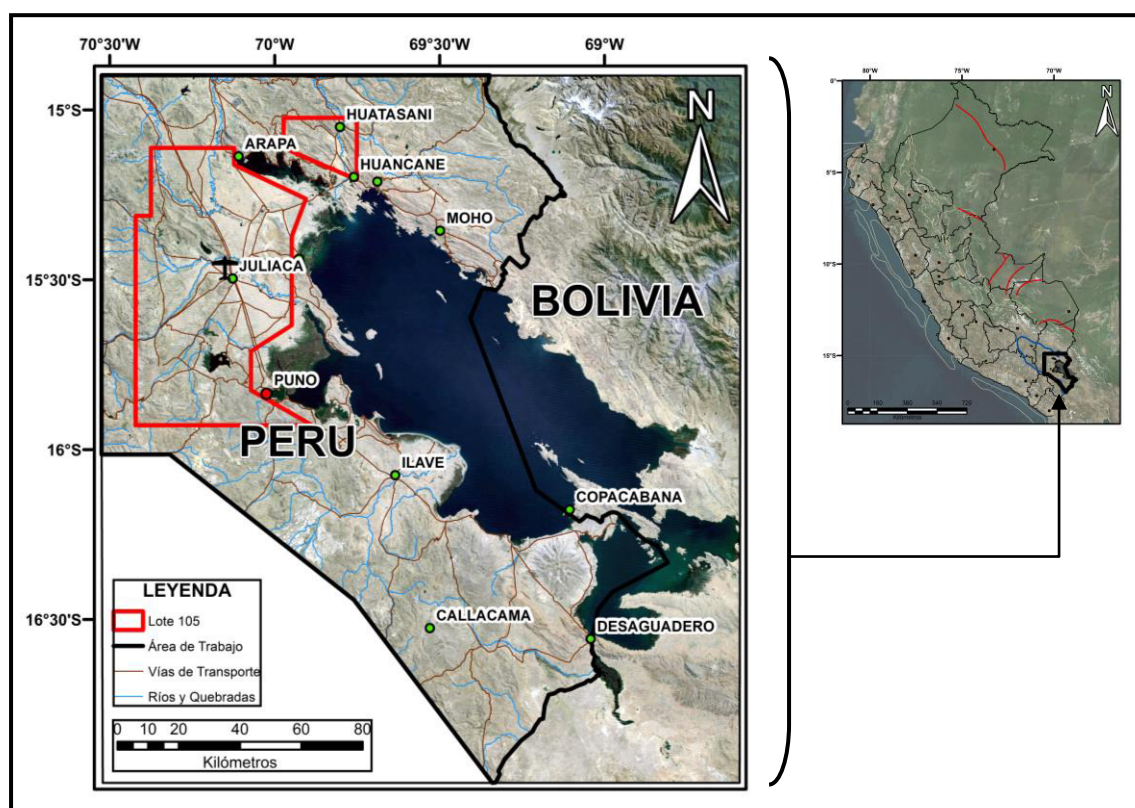


Fig. 2. Ubicación y Extensión del área de trabajo.

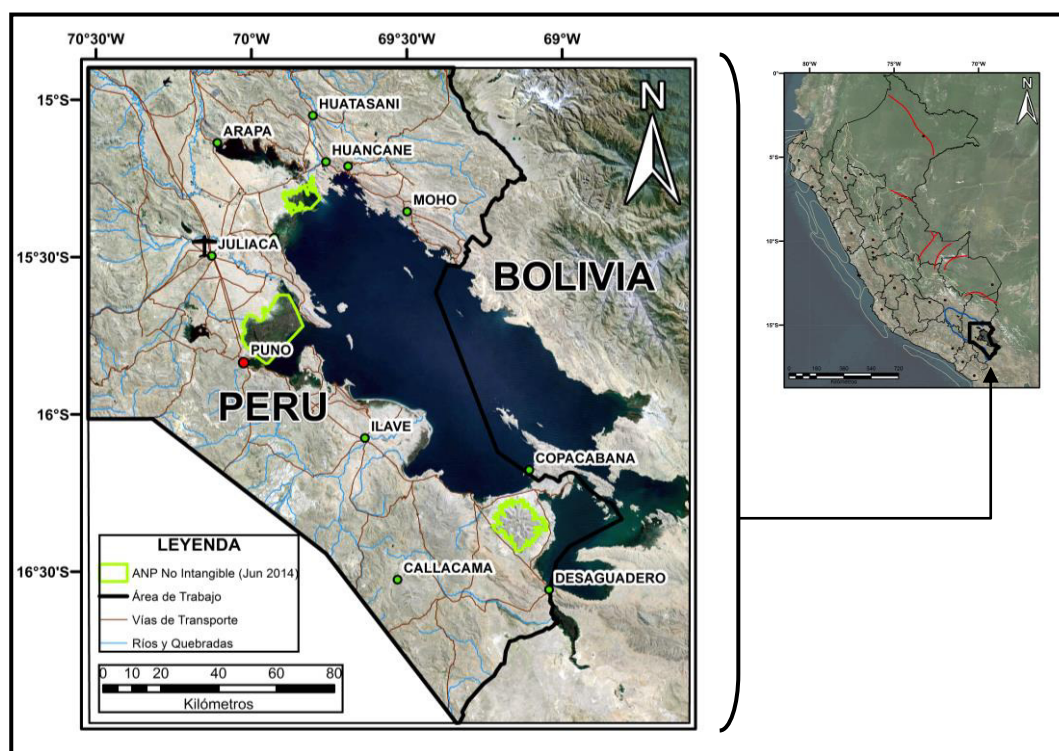


Fig. 3. Ubicación y Extensión de las Áreas Nacionales dentro del área de trabajo.

1.1.2. Accesibilidad

Las principales vías de acceso a la zona de estudio, son por medio terrestre o aéreo.

Por vía terrestre, partiendo de Lima, existen varias posibilidades para poder llegar a Juliaca, y a partir de ahí, dirigirnos a los afloramientos estipulados. Probablemente, la opción más recomendada es tomar la carretera Panamericana Sur y la variante de Uchumayo hasta llegar a Arequipa y posteriormente tomar la nueva ruta de Santa Lucía a Juliaca, con un tiempo estimado de viaje de 18 a 20 horas, basados en que la distancia de Juliaca a Lima es de aproximadamente mil doscientos setenta kilómetros. Una ventaja muy importante para el desarrollo de los trabajos de campo en la cuenca, es la interconexión de las vías terrestres y la cantidad de ellas, a pesar de que no todas se encuentran en perfectas condiciones.

Por vía aérea, definitivamente esta es la vía más adecuada para ingresar al área de estudio; el viaje desde Lima hasta el Aeropuerto de Juliaca, ciudad que forma parte del departamento de Puno, dura aproximadamente una hora y cuarenta y cinco minutos. Para los vuelos desde Lima a Juliaca, existen salidas regulares todos los días de dos de las principales agencias de viajes del país, considerando que uno puede discernir la posibilidad de hacer escala previa en Arequipa o en un vuelo directo.

1.1.3. Geomorfología

Dentro de este marco general, las unidades geomorfológicas en parte de la cuenca, se pueden organizar en grandes grupos: llanuras y depresiones, depósitos de vertiente, colinas, mesetas, montañas y superficies de agua.

1.1.3.1. Llanuras y depresiones actuales y recientes

Se trata de las formas más bajas y planas del área, cuyas unidades se distinguen por la génesis y posición de los depósitos. En principio, este grupo comprende cuatro unidades, a saber: llanura fluvio-lacustre actual (valles aluviales, llanura fluvio-lacustre deposicional), depresiones (salares y otras depresiones), terrazas fluvio-lacustres (conservadas y degradadas) y acumulaciones eólicas.

1.1.3.2. Depósitos de vertiente

Se trata básicamente de tres tipos de acumulaciones cuaternarias: los depósitos detríticos y/o coluviales de piedemonte, las acumulaciones morrénicas y los abanicos aluviales.

1.1.3.3. Colinas

Las colinas son serranías bajas localizadas al interior de la región, resultantes del plegamiento de los terrenos terciarios de relleno de la fosa tectónica del altiplano y constituidos en general por rocas sedimentarias de baja resistencia a los fenómenos erosivos.

1.1.3.4. Meseta volcánica

Se trata de altiplanicies relativamente grandes, localizadas cerca o junto a las cordilleras y caracterizadas por superficies uniformes a ligeramente onduladas, con drenaje subparalelo de surcos netos, los cuales, al profundizarse, se encajan entre paredes escarpadas.

1.1.3.5. Montañas

Se trata de los relieves más fuertes y competentes de la cuenca, limitados a las márgenes interiores de las cordilleras Oriental y Occidental y a algunos macizos montañosos aislados al interior del Sistema.

1.1.3.6. Superficies de agua

Finalmente, es necesario citar a las superficies de agua permanente, constituidas principalmente por los lagos Titicaca, Arapa, y otros menores.

1.1.4. Principales elementos climáticos

1.1.4.1 Clima

La zona de la cuenca del Lago Titicaca se caracteriza por tratarse de un clima templado, diferenciado en distintas áreas:

- El tipo de clima lluvioso y semifrío con otoño, invierno y primavera secos ocurre en las cabeceras de las cuencas del río Suchez, río Ramis y cuenca del río Coata a altitudes entre 4.400 y los 5.000 metros. Los días helados son superiores a los 150 días. Si bien la precipitación tiene un carácter lluvioso, precipita entre los 700 y 1.000 mm, las características térmicas determinan una restricción en la utilización de la tierra con fines agrícolas.
- El área circunlacustre, cuenca del río Suchez, parte media de la cuenca del río Ramis, cuenca del río Coata y cuenca del río Llave quedan incluidos dentro del tipo climático lluvioso y frío con otoño, invierno y primavera secos. Su carácter lluvioso está dando precipitaciones también entre 700 y 1000 mm.
- El tipo de climático semilluvioso frío con otoño, invierno y primavera secos corresponde a la parte baja de la cuenca del río Ramis y gran parte de la cuenca del río Huancané, y al sur del lago, hasta las zonas de Pizacoma en el Perú e Irpa Chico en Bolivia. En esta sub-zona la precipitación disminuye y varía entre 600 y 800 mm. El número de heladas es menor y las condiciones para las actividades agrícolas son buenas.

1.1.4.2 Temperatura

La temperatura depende de varios factores: la longitud (más frío al oeste que al este por la influencia de las masas de aire húmedo de la Amazonia), la altitud (la temperatura disminuye con la altitud), y el efecto termoregulador del Lago Titicaca.

El sector noreste de la región es el que tiene las temperaturas medias más elevadas para todas las altitudes (2,9°C para 5.000 m), seguido por el sector sureste (0,8°C), el noroeste (0,1°C) y, finalmente, el Suroeste (-2,8°C). No obstante, para altitudes menores de 4.400 m el sector noroeste presenta temperaturas superiores a las del sureste.

1.1.4.3. Viento

Los vientos de superficie son principalmente el resultado de los patrones locales de relieve, los cuales tienden a canalizar los vientos en direcciones específicas. En la zona del lago Titicaca se genera además una circulación lago-tierra-lago, resultado de las diferencias de temperatura entre la tierra y la superficie acuática. Durante el día, los vientos soplan del lago hacia las riberas, debido a que la tierra se calienta más que el lago, generándose así una zona de más baja presión sobre la primera. Durante la noche se invierte la circulación, debido a que la tierra se enfría más que el lago y, en consecuencia, la menor presión se forma sobre este último.

En relación con la velocidad y la dirección del viento la situación es muy parecida a lo largo del año:

- En el norte (cabeceras del Coata y Ramis) predominan las calmas, con valores frecuentemente por encima del 50%, la velocidad puede llegar hasta 4,8 m/s. En los meses de invierno la velocidad del viento tiende a ser mayor en cerca de 1 m/s a las velocidades de verano.
- En la zona del lago Titicaca los vientos predominantes vienen del lago, con velocidades entre 2 y 4 m/s, aunque las calmas pueden alcanzar localmente valores bastante altos.

1.1.4.4 Precipitación

La distribución espacial de la precipitación media anual tiene un patrón decreciente de norte a sur. En general, ella varía de 200 a 1.400 mm, con sus máximos valores (entre 800 y 1.400 mm) sobre el lago Titicaca. Por fuera de la zona lacustre, la zona más lluviosa se encuentra en el extremo norte de la cuenca (cabeceras de los ríos Coata y Ramis), donde se alcanzan valores entre 800 y 1.000 mm; luego se produce un decrecimiento paulatino de la lluvia en la región del altiplano hasta alcanzar la cifra de 400 mm aproximadamente. En estrecha relación con la precipitación, el número de días con lluvia al año pasa de 131 a 153 en las cabeceras del río Coata, con 131-153 días y a 80-100 en la orilla sur del lago Titicaca.

1.1.4.5 Humedad Relativa

La humedad relativa en general es baja en toda la cuenca. El promedio anual en toda la región es del 54%, si bien ella varía desde 42-47% en el sur hasta 62-65% en las riberas del Lago Titicaca. Durante los meses de junio a octubre la humedad del aire es por lo general igual o inferior al 50% en toda la región, mientras que en la estación de lluvias (diciembre a marzo) puede alcanzar hasta el 70%. A nivel diario, en general, la humedad relativa tiene un comportamiento inverso a la temperatura: baja al comienzo de la tarde y más elevada en la noche.

1.2. HISTORIA DE LAS ACTIVIDADES PETROLERAS EN EL ALTIPLANO

En el transcurso del tiempo, la actividad exploratoria en la Cuenca Altiplánica fue desarrollada por distintas compañías tanto estatales como privadas, las cuales aportaron con información adquirida así como con sus respectivas interpretaciones, a poder mejorar el análisis de la Cuenca Titicaca.

Los primeros trabajos de inversión petrolera, registrados en actas, datan de finales de 1900, a cargo de la empresa Coro Coro Company, las cuales perforaron utilizando cable rig descubriendo hidrocarburos a menos de los 120 m. La siguiente compañía en realizar trabajos de exploración, entre 1911 y 1915, fue la compañía Titicaca Oil Company, la cual extrajo alrededor de 281 250 barriles contando con 07 pozos productores, la mayor producción acumulada en la cuenca hasta la actualidad del antaño Yacimiento Pirin. Posteriormente, las compañías Corporación Peruana así como la Sociedad de Petróleos de España, perforan 03 pozos secos y 05 muy someros respectivamente, sin resultados alentadores, entre 1917 y 1925.

El Gobierno Peruano, operó el campo a través del Cuerpo de Ingeniero de Minas, entre 1939 y 1946; perforando 10 pozos secos en Pirin y 07 entre 2 y 5 kilómetros al sureste de Pirin.

Las compañías petroleras estatales y privadas realizaron extensivos trabajos geológicos de campo y foto-geológicos entre 1958 y 1986, entre las que destacan Empresa Petrolera Fiscal, Texaco, Peruvian Gulf Oil Company y Petroperu S.A. Peruvian Oil Company también adquirió información aeromagnetométrica en 1969.

La compañía rusa Yugansk Petro Andes S.A. y Yuganskneftegas S.A. exploraron los bordes noroeste y oeste del Lago Titicaca, con sus lotes en contratos, S-2 y S-4, cubriendo información sísmica en ambos bloques entre 1994 y 1996. Seguidamente, la compañía peruana Petro Andes S.A. que inició las exploraciones en la cuenca en 1991, se asoció con las compañías rusas para formar el consorcio Yugansk-PetroAndes que perforó tres *wildcats* Coata 1X, Coata 2X y Ayabacas 1X en los antiguos lotes S-2 y S-4. (Ver en Capítulo III y IV).

Luego, la compañía rusa YUKOS adquirió entre el 2002 y 2003, un contrato de evaluación técnica (TEA), en los antiguo lotes bloques mencionados. Finalmente las empresas, Siberian Oil Company así como Pan Andean Resources S.A. realizaron los últimos trabajos de exploración en la cuenca, tanto en el actual lote 105, como el antiguo lote 141.

Cabe indicar, que Perupetro S.A. en convenio con el IRD, realizaron los últimos trabajos en el área tanto en el 2006 y 2007, enfocados en generar nuevas oportunidades para el desarrollo energético de la región (Ver en Capítulo III).

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cuenca Titicaca ha sido explorada con fines hidrocarburíferos desde finales de 1900, generando resultados fructíferos con la explotación del yacimiento de petróleo más alto de mundo, "Campo Pirin", con una producción acumulada de 300 000 barriles de crudo de alta calidad (37.7° API).

Sin embargo, a pesar de haber sido un campo prolífico, la cuenca sub-explorada del altiplano peruano carece de información técnica moderna tanto en superficie como en subsuelo, así como una correcta aplicación de consideraciones geológicas actualizadas la cual permitiría proponer nuevos modelos con la finalidad de descubrir nuevos yacimientos de hidrocarburos.

Dentro de los principales inconvenientes que se manifiestan en el área de estudio, sumado a la falta de información actualizada, se encuentran también la incertidumbre estratigráfica para la correcta designación de unidades geológicas, la cual genera una errada interpretación de todos los componentes de un sistema petrolero, así como un entendimiento de los mecanismos de estructuración, deformación y sedimentación para la Cuenca Titicaca.

1.4. OBJETIVOS

Los objetivos del presente estudio son:

- Generar una base de datos GIS integrada del proyecto, la cual permitirá poder desarrollar una correcta gestión de la información del trabajo, acorde con los estándares actuales.
- Realizar un análisis geométrico de la deformación del Altiplano Sur Peruano, que permitirá entender la configuración arquitectural de la cuenca, mediante la construcción de una sección estructural así como generar su respectivo corte balanceado. (Fig. 4)
- Analizar la cinemática de la deformación mediante dataciones termo-cronológicas y estudio de las relaciones tectónica-sedimentación.
- Integrar la información geológica, y proponer un diagrama de distribución lito-estratigráfico de la zona de estudio.
- Proponer y modelar, uno o más sistemas petroleros, basados en la información precedida.

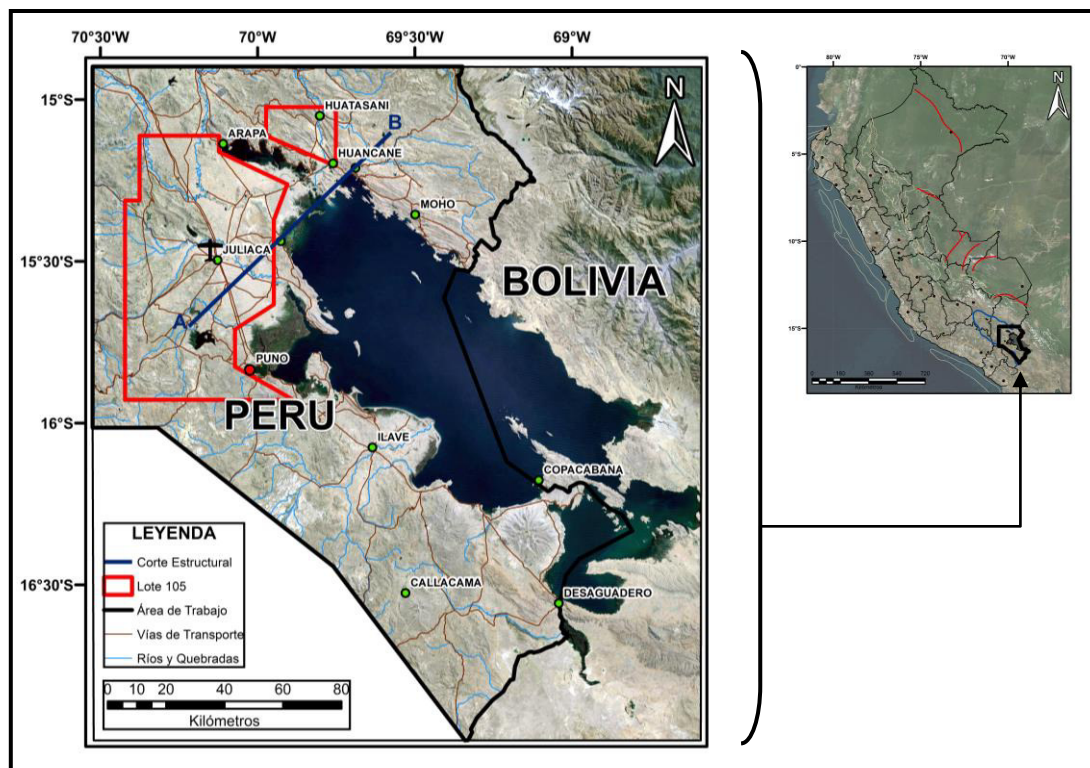


Fig. 4. Ubicación de la sección balanceada propuesta.

1.5. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

1.5.1. Adquisición e Integración de Información de Superficie

Este apartado tiene dos componentes. El primero comprende la campaña de campo realizada por el equipo de IRD-YPFB en Bolivia y Perú en julio del 2014, del cual se tomó un control de datos estratigráficos y estructurales. El segundo componente comprende la compilación de las campañas de campo de IRD - Perupetro en el 2006 y 2007 (Perupetro S.A., 2008), y trabajos bibliográficos de distintos levantamientos geológicos en la zona de estudio (Ver Capítulo II). Posterior a esto, se añadió también los datos estructurales de los distintos cuadrángulos del INGEMMET (www.ingemmet.gob.pe) a un proyecto integral en un software GIS, para gestionar óptimamente nuestra base de datos.

1.5.2. Manejo de Imágenes Landsat y DEM

Para poder generar un mapa geológico del proyecto, fue necesario apoyarnos en las imágenes satelitales y/o DEM, los cuales demarcaron un control de la información estructural recolectada para el presente estudio. Así mismo, permitieron resaltar los detalles morfológicos de las superficies, de caminos, cuerpos de agua y vegetación, a partir de manejar indistintas fuentes gratuitas para la obtención de imágenes satelitales, y descargar los DEM's de la web de la NASA (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>).

1.5.3. Construcción e Interpretación de secciones sísmicas y datos de pozo

Con la finalidad de generar una interpretación de las unidades geológicas en el subsuelo, fue necesario considerar la sección sísmica reprocesada S2-41 de la campaña PTASOJ9194LS2, ubicada al sureste de la ciudad de Juliaca (378770 - 8285923), integrándola con la información de los pozos; y controlando su calibración a partir de datos estructurales en superficie. Cabe indicar, que la data utilizada fue proporcionada por la base de datos de PERUPETRO S.A.

1.5.4. Elaboración de una nueva propuesta de modelo litoestratigráfico

Basado en la interpretación sísmica, junto con las correlaciones de pozos y la información de superficie, se procedió a realizar una nueva propuesta estratigráfica que nos ayuda a entender la distribución de las unidades geológicas y el sistema petrolero a lo largo de la zona de estudio.

1.5.5. Conversión Tiempo - Profundidad

Con la finalidad de poder integrar nuestra sección sísmica a la sección estructural, es necesario previamente realizar la conversión de dicha información, manejada en valores de tiempo, a valores de profundidad. Por tal motivo, en el presente trabajo se ha contrastado, la conversión tiempo-profundidad a partir de la generación de un sismograma sintético así como de la tabla extraída a partir de las velocidades RMS del procesamiento sísmico para lograr una correcta conversión (Ver Capítulo IV).

1.5.6. Construcción de secciones estructurales balanceadas

La construcción de un corte balanceado (Fig. 5), queda limitada a partir del manejo de una sección estructural que tiene que ser validada en función a los fundamentos que competen al balanceo de secciones, puesto que *"Si realmente entendemos como se forman las estructuras entonces debemos ser capaces de retrodeformarlas"*. (Woodward et al., 1985). Motivo por el cual, se dispuso la generación de una sección estructural en el software Move de la empresa Midland Valley, integrando los datos de afloramiento, secciones sísmicas en profundidad, así como la información extraída de pozo; para posterior a eso, aplicar la mencionada metodología en la plataforma 2dMove y generar el producto pretendido.

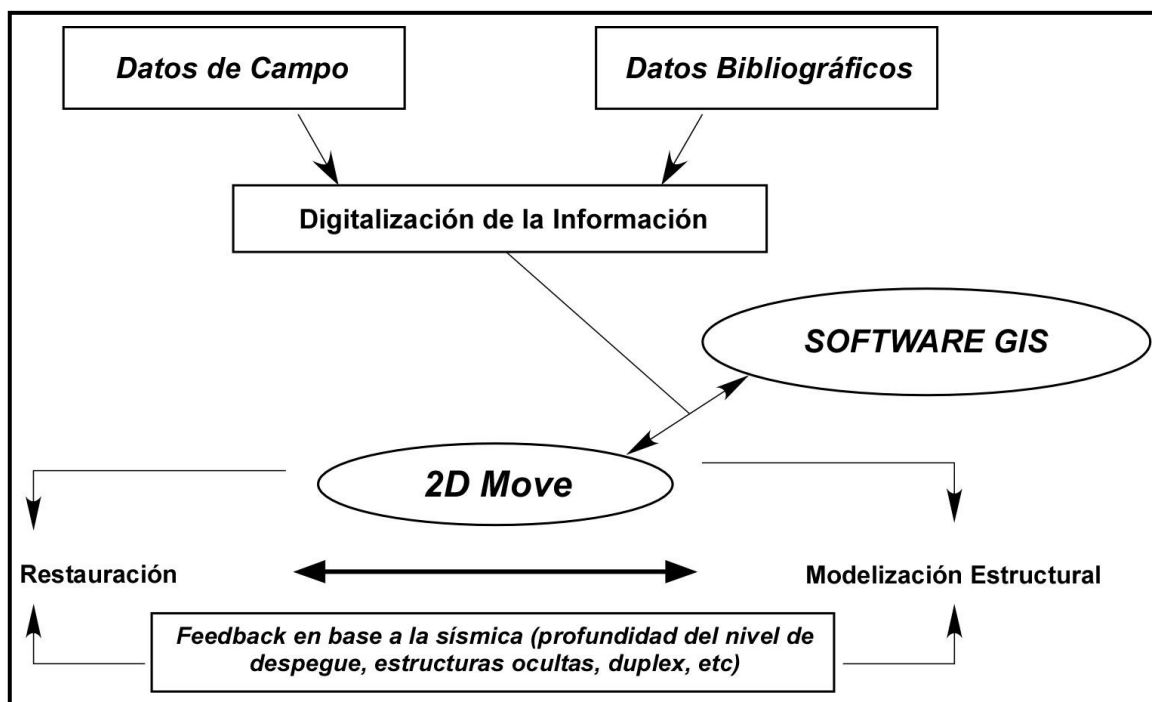


Fig. 5. Flujo de trabajo para la construcción de un corte balanceado (Modificado de Mouret et al., 2012).

1.5.7. Modelado de Sistema Petrolero

El modelado de sistemas petroleros consta de dos etapas principales: la construcción del modelo y el modelado directo (Fig. 6). La construcción del modelo implica principalmente la evaluación estructural y la cronología de la depositación. El método de modelado directo ejecuta cálculos sobre el modelo para simular el sepultamiento de los sedimentos, los cambios de presión y temperatura, la madurez del kerógeno y la expulsión, migración y acumulación de hidrocarburos. Mediante la calibración se comparan los resultados del modelo con las mediciones independientes a fin de permitir el refinamiento del modelo (Schlumberger, 2009).

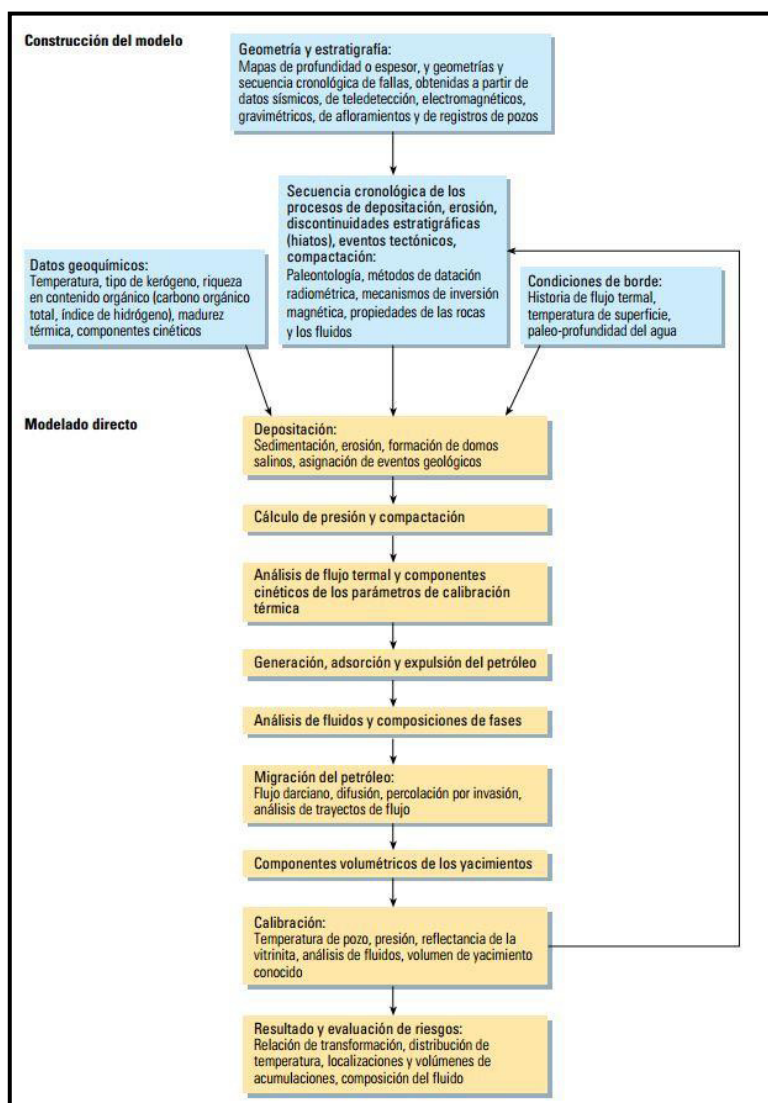


Fig. 6. Flujo de trabajo para el Modelado de Sistemas Petroleros (Schlumberger, 2009).

CAPÍTULO II. TRABAJOS PREVIOS: CONTEXTO GEODINÁMICO, ESTRATIGRAFÍA Y MODELOS ESTRUCTURALES

2.1. LOS ANDES CENTRALES.....	13
2.1.1. Generalidades	13
2.1.2. Unidades Morfoestructurales	14
2.1.3. Evolución Geodinámica	16
2.2. EL ALTIPLANO SUR PERUANO	20
2.2.1. Estratigrafía Regional.....	20
2.2.2. Modelos estructurales	33

CAPÍTULO II. TRABAJOS PREVIOS: CONTEXTO GEODINÁMICO, ESTRATIGRAFÍA Y MODELOS ESTRUCTURALES

2.1. LOS ANDES CENTRALES

2.1.1. Generalidades

La Cordillera de los Andes es clásicamente considerada como uno de los mejores ejemplos de cadena de montañas edificada a lo largo de un margen continental por procesos tectónicos ligados a la subducción de una placa oceánica, en un contexto aparentemente no colisional (Jolivet, 1995). En efecto, la Cordillera de los Andes se extiende a lo largo de aproximadamente 8000 km del margen oeste de Sudamérica como resultado del esfuerzo compresional asociado a la subducción de la placa de Nazca con la placa Sudamericana (Fig. 7).

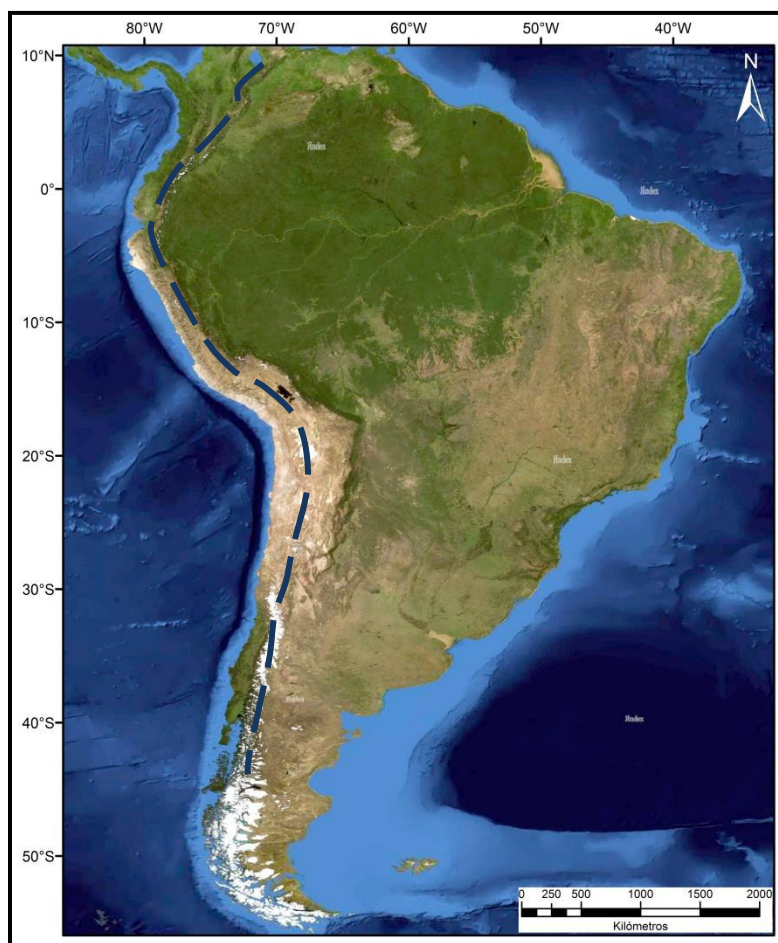


Fig. 7. Imagen satelital mostrando la orientación preferencial de la Cordillera de los Andes.

Los Andes Centrales al Norte de Chile, Bolivia y sur del Perú forman la parte más amplia de la cadena de montañas, extendiéndose aproximadamente 1800 kilómetros de norte a sur y 200 a 450 km de oeste a este; siendo la parte más oriental la que contiene la mayor cantidad de deformación puesto que actúa como una faja plegada y corrida. Del Altiplano se asume que es producto principalmente del resultado del acortamiento y engrosamiento tectónico asociado con la faja plegada andina (Isacks, 1988; Sheffels, 1990; Schmitz, 1994; Lamb y Hoke, 1997) que inició aproximadamente en el Cretáceo tardío - Paleoceno temprano (Coney y Evenchick, 1994; Sempere, 1995; Sempere et al., 1997; Horton y DeCelles, 1997; Horton et al., 2001).

Las causas y mecanismos del acortamiento cortical en los Andes Centrales, ha sido explicado por Baby et al. (1997), refiriendo al Altiplano, como una compleja cuenca intra-montaña neógena deformada por tectonismo extensional y compresional.

2.1.2. Unidades Morfoestructurales

Los Andes Centrales se dividen en cuatro provincias morfoestructurales distintas: Cordillera Occidental, Altiplano, Cordillera Oriental y Zona Subandina (Fig. 8). La meseta de los Andes Centrales es definida como la región con un promedio de elevación superior a los 3 km (Isacks, 1988; Gubels et al., 1993; Masek et al., 1994; Lamb and Hoke, 1997) y contiene 3 de las distintas provincias fisiográficas (McQuarrie and DeCelles, 2001). La Cordillera Occidental con una elevación máxima de 5000 msnm, se caracteriza por constituir el batolito plutónico andino de mayor volumen. En general, esta cordillera se orienta en dirección NW a SE; caracterizado por presentar una alineación de conos volcánicos sobre una longitud aproximada de 300 km con la misma dirección (Bernal y Tavera, 2002). El Altiplano es una gran cuenca endorreica constituida principalmente por depósitos sedimentarios y volcánicos cenozoicos además viene a ser el segundo más extenso alto plateau del mundo. (Sempere et al., 2004). Para algunos autores es una cuenca aislada a partir del Mioceno Superior hasta el presente (Vandervoort et al., 1995);, mientras que otros proponen que data desde finales del Cretáceo Superior a la actualidad. (Lamb and Hoke, 1997). A su vez, la Cordillera Oriental con una altura de alrededor de 4000 msnm se distribuye lateralmente en un rango de 90 km presentando una orientación NW - SE; constituyéndose de una faja plegada erosionada pre - cretácica que principalmente deforma rocas sedimentarias metamórficas paleozoicas localmente intruidas por granitos pérmicos y triásicos (Louterbach, 2014).

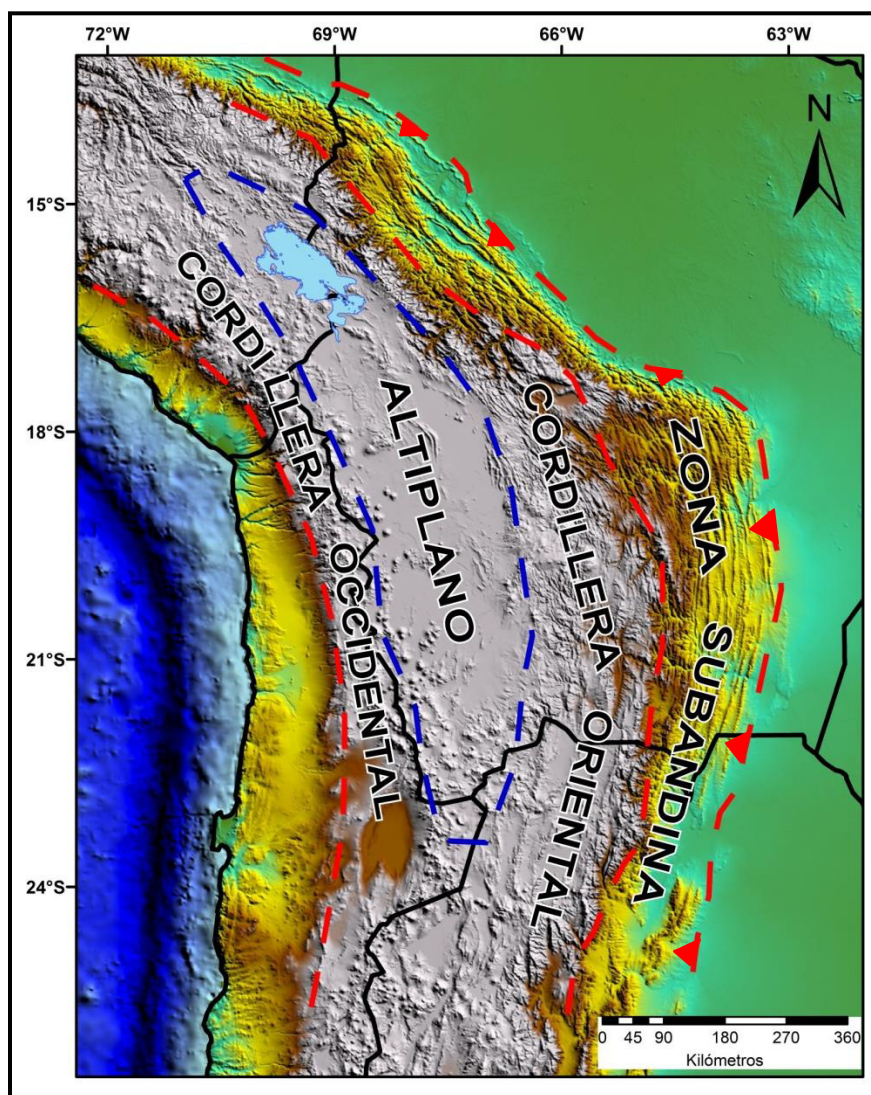


Fig. 8. Mapa de elevación digital (DEM) mostrando las unidades morfoestructurales de la Cordillera de los Andes.

Por su parte, la Zona Subandina, ubicada al límite este de las mencionadas morfoestructuras, se caracteriza por ser la parte más activa tectónicamente hablando, traduciéndose ésta en un fuerte plegamiento originando una espesa secuencia continental de rocas sedimentarias con vergencia contraria a las que se presentan en el altiplano. (Fig. 9)

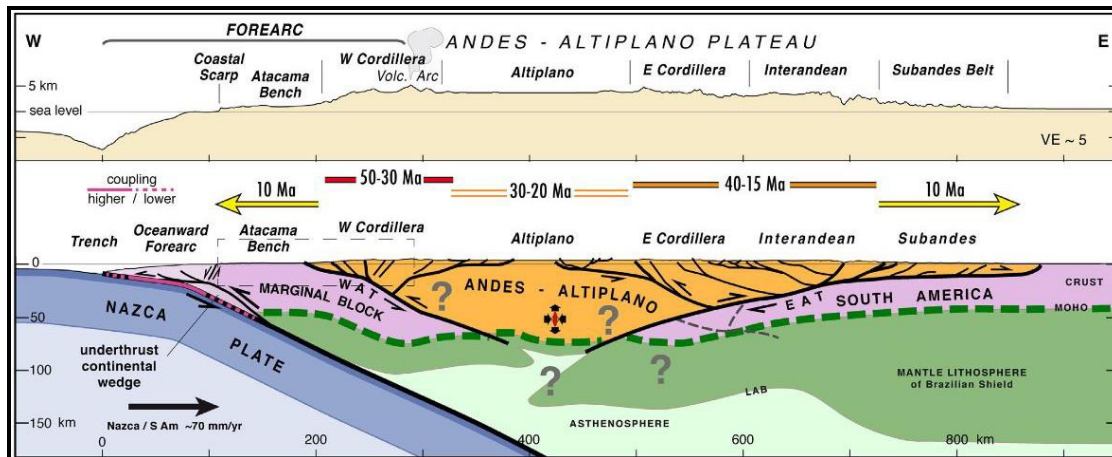


Fig. 9. Corte estructural regional W - E (21° S) mostrando las principales estructuras de los Andes (Armijo et al., 2015).

2.1.3. Evolución Geodinámica

Las mesetas del Tíbet y de los Andes Centrales son los más grandes orógenos tectónicamente activos. A pesar de tan tamaño importancia, los mecanismos que explican la topografía actual, modelos tectónicos y evolución geodinámica de los Andes Centrales y en consecuencia del Altiplano siguen siendo motivo de discusión y requieren de una investigación significativa enfocada en absolver las interrogantes persistentes.

En la actualidad, diversos autores han mostrado la importancia del acortamiento cortical para poder explicar de las principales estructuras en los Andes Centrales. (Allmendinger et al., 1986; Isacks, 1988; Roeder, 1988; Sheffels, 1990; Sempere et al., 1990; Baby et al., 1992; Gubbels et al., 1993; Schmitz, 1994; Kley y Reinhardt, 1994; Dunn et al., 1995). Es por esto que consideramos preponderante explicar la distribución de este acortamiento en base a la construcción de secciones balanceadas, que apoyadas en información geológica y geofísica, han demostrado la estructuración de este sector de los Andes, que conlleva a explicar el levantamiento del Altiplano condicionando las unidades sedimentarias ligadas a este. (Modificado de Baby et al., 1997)

Las secciones que muestro, fueron desarrolladas al norte y sur de Bolivia (Fig. 10), enfocadas en los Andes Centrales, indicando valores de acortamiento que varían desde 191 a 231 km respectivamente (Fig. 11) (Baby et al., 1997). Los valores que presentan del acortamiento son contrastados con los trabajos de Sheffels (1990) resultando datos coincidentes (210 km en la parte central), concluyendo que existe una tendencia proporcional que al incrementarse el acortamiento, aumenta el espesor de la corteza (Beck et al., 1996).

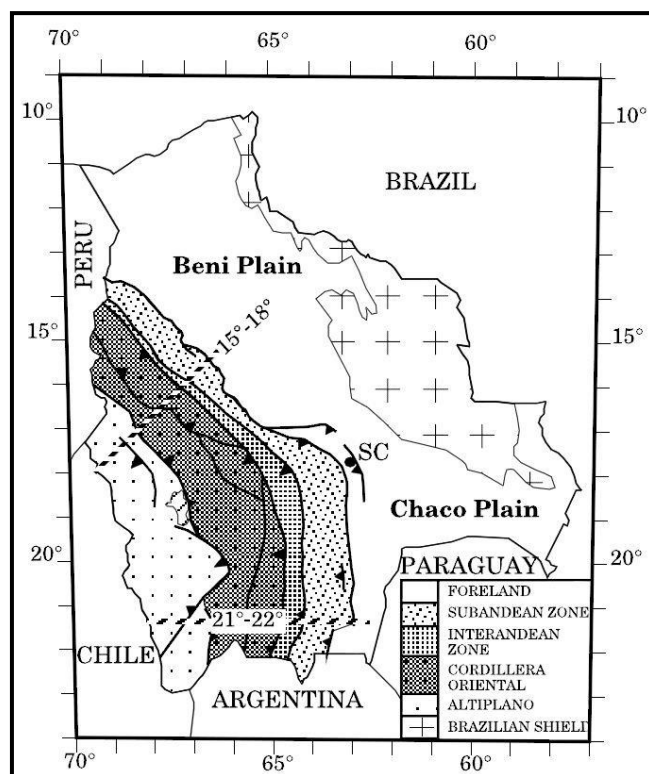


Fig. 10. Ubicación de las secciones estructurales desarrolladas (Baby et al., 1997).

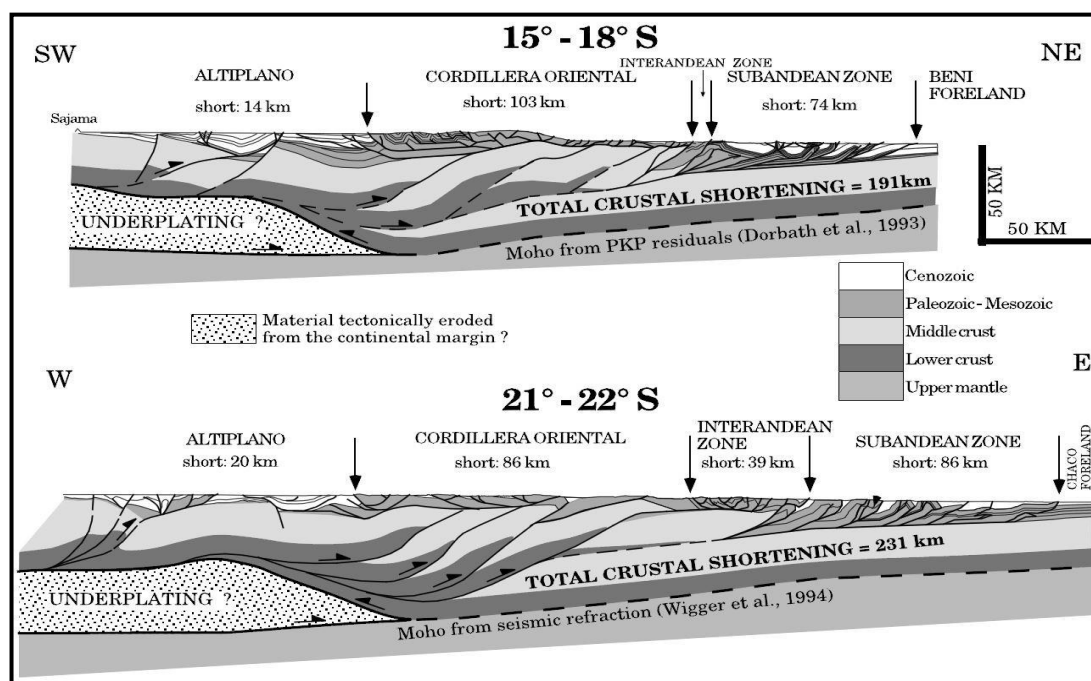


Fig. 11. Cortes balanceados mostrando la morfología actual de los Andes Centrales (Baby et al., 1997).

Tanto en el sector norte como en el sur, los acortamiento asociados a eventos neógenos no son suficientes para poder explicar el espesor evidenciado a partir de datos geofísicos, debajo del Altiplano; más aún las estructuras tipo duplex de corteza, pueden esclarecer los espesores para el sector debajo de la Cordillera Oriental (Baby et al., 1997). Roeder y Chamberlain (1995) propusieron un modelo de deformación previo al acortamiento neógeno, que pudiese explicar el gran espesor cortical para el Altiplano, sin embargo Baby et al. (1997) no corrobora dicha premisa al no encontrar evidencia de un acortamiento a inicio o mediados del Terciario, así como no indicar rastros de erosión más antigua que la ya conocida pre-cretácica, por lo que desestimamos el postulado previo. Es necesario entender, que durante finales del Paleoceno e inicios del Oligoceno, lo que es actualmente el Altiplano, se comportaba como una cuenca de antepaís (Sempere, 1995).

Para el presente trabajo consideramos, que el espesor cortical así como el levantamiento del Altiplano, guarda estrecha relación con la presencia de sedimentos provenientes de la acción de la subducción, los cuales generan un mecanismo de una corteza underplating para explicar el gran espesor cortical asociado al espacio debajo del Altiplano (Schmitz, 1994; Baby et al., 1997). Consideramos que el postulado que argumenta Baby et al. 1997, que aproximadamente a principios del neógeno, el Altiplano fue consecuencia del movimiento del volumen del material erosionado (underplating), el cual migró hacia al este, causando su levantamiento y relacionado de manera intrínseca con el desarrollo de la Cordillera Oriental; difiriendo con los procesos que originaron el levantamiento de los Himalayas, Alpes o Pirineos.

En función a la premisa mencionada, considero necesario generar una síntesis de eventos con la finalidad de generar un modelo deductivo del levantamiento del área, por ende es necesario conocer que existen factores que sirven de evidencia para sustentar dicha teoría; tales como (1) la actual estructura de la litosfera deducida del cartografiado, estudios geofísicos y secciones balanceadas, (2) la historia de la deformación inferida de los estudios geocronológicos, (3) la historia de la deformación estimada a partir de los datos de la exhumación de las rocas, (4) la evolución del manto litosférico y la geometría de la subducción inferidas de la geocronología y geoquímica del magmatismo y emisiones de Helio, (5) la historia del levantamiento limitada por sedimentos marinos, paleobotánica, cambios biotácicos, paleoclimatología, superficies de erosión y paleoaltimetría, y finalmente (6) la historia de la incisión fluvial en los márgenes del altiplano cuantificados de la geomorfología, estratigrafía y análisis termocronológicos. (Barnes y Ehlers, 2009).

Apoyados en dichos factores mostramos la secuencialidad de eventos, basado principalmente en evidencias publicadas de datos geo-termocronológicos (Tabla 01), estudios de exhumación (Tabla 02), análisis geoquímicos y/o magmáticos (Tabla 03), entre otros, que marcaron el desarrollo de los Andes Centrales, que congenian con lo postulado con Baby et al. (1997), en el que manifiesta que existe una tendencia principal de la deformación, sedimentación y exhumación que progresa hacia el este, siendo el inicio de tales eventos aproximadamente en el Paleoceno - Eoceno. Siendo más específicos; la deformación y posterior exhumación empezó a lo largo del flanco occidental entre aproximadamente los 60 - 40 Ma con un desplazamiento registrado en la Cordillera Oriental a los 40 Ma. La deformación de la Cordillera Oriental continuó y se distribuyó, desde los ~40 - 20 Ma y fue seguida por una propagación con dirección al este hacia la Zona Interandina y al Oeste hacia la Zona del Altiplano desde aproximadamente 20 Ma hasta los 10 - 5 Ma. El ancho actual del Altiplano se infiere que pudo ser alcanzado entre los 25 y 5 Ma. La deformación y posterior exhumación se propagaron con dirección al este en la Zona Subandina alrededor de los 15 a 10 Ma y continúa hasta la actualidad. Es necesario indicar, que se tienen datos de una exhumación más joven, atribuyéndose ésta a un evento de principios del Mioceno medio a la actualidad (~23 - 0 Ma), que fue probablemente el resultado de una mayor erosión a lo largo del flanco norte del Altiplano y relacionado con la deformación del flanco sur de la Puna (Fig. 12) (Bernes y Ehlers, 2009).

Finalmente consideramos que a partir del contraste de la interpretación de Baby et al. (1997) y Sheffels (1990) con los datos extraídos de la información termocronológica, pudimos dilucidar un modelo coherente para este sector de los Andes.

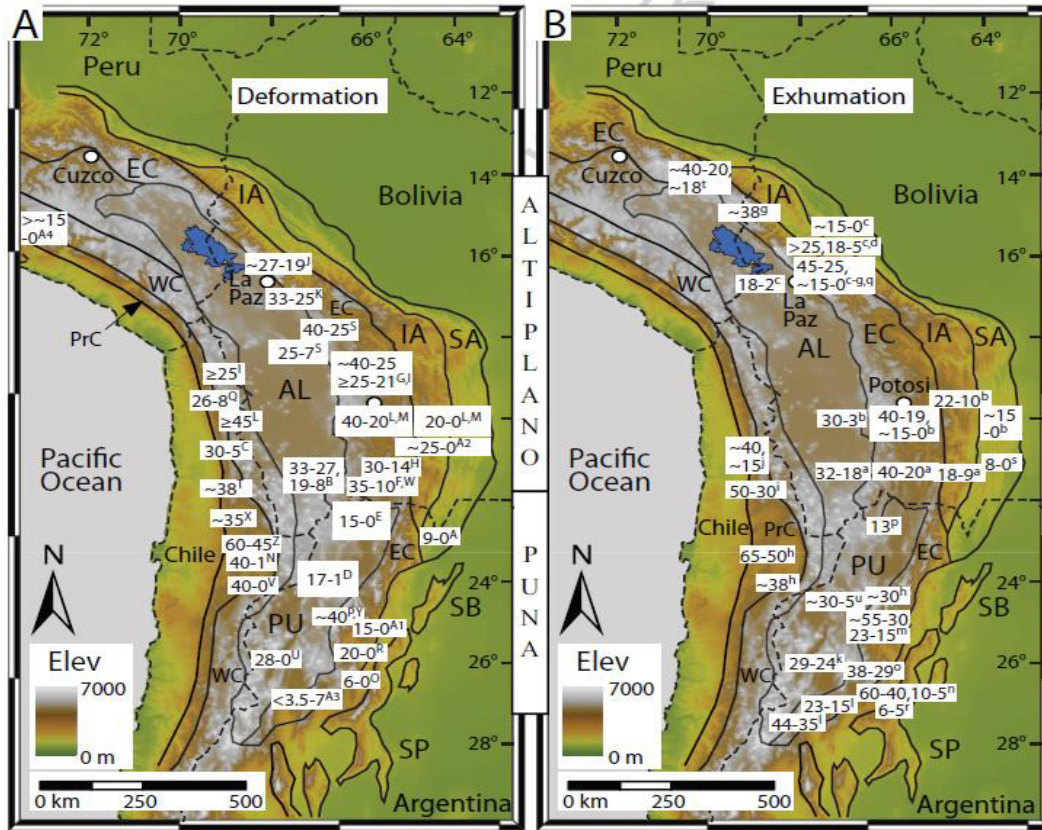


Fig. 12. A y B. Imagen mostrando las edades de deformación y exhumación de la zona de estudio. (Bernes y Ehlers, 2009) Nótese que las edades asociadas a la deformación subandina son menores que las del Altiplano o Cordillera Oriental. (PrC = Pre Cordillera, WC = Cordillera Occidental, AL / PU = Altiplano / Puna, EC = Cordillera Oriental, IA = Zona Interandina, SA = Subandino, SB / SP = Santa Bárbara / Sierras Pampeanas).

2.2. EL ALTIPLANO SUR PERUANO

2.2.1. Estratigrafía Regional

La estratigrafía del área de estudio, ha sido tema de discusión a lo largo de todos estos años; desde las primeras campañas de exploración geológicas a cargo de Cabrera, La Rosa y Petersen (1936) además de N. Newell (1949) en la década del 40, a la fecha ha habido sustanciales cambios en la disposición de la pila sedimentaria, variando ésta en función a muchos factores, entre los que se menciona desde la interpretación personal del geólogo encargado del estudio hasta el dato más fehacientes, las dataciones a las rocas existentes.

A continuación, haré un recuento de las principales propuestas de disposición estratigráfica de los geólogos que enfocaron sus estudios en el área de desarrollo de este trabajo.

Los primeros datos bibliográficos que presentamos hacen referencia a Norman D. Newell (1949) quien realiza un trabajo exhaustivo de campo y publica la primera propuesta de la columna estratigráfica tipo en la región del Lago Titicaca, mostrando de base a tope, secuencias silúricas - devónicas preponderantemente de origen marino, niveles permo - carboníferas marinos y continentales, sedimentos marinos jurásicos superiores, niveles cretácicos tanto marinos como no marinos; para culminar en paquetes terciarios intercalados con secuencias volcánicas y rellanando el área una extensa cobertura cuaternaria; es necesario mencionar que a la fecha dicho trabajo sirve de guía para muchos geólogos que empiezan a involucrarse en esta zona, claro está, con importantes modificaciones propias de las nuevas reinterpretaciones. (Fig. 13)

		Metros
PLEISTOCENO	Depósito Aluvial, Morrenas	20
	Capa de Arcillas del Río Azángaro (depósitos del antiguo Lago Ballivián, ancestro del Titicaca).	100
	Volcánicos Sillapaca; andesita y flujo de basaltos, tobas, brechas, que forman la cubierta de la Cordillera Occidental.	500
SISTEMA TERCIARIO	Discordancia Angular: Infrayaciendo capas plegadas y fracturadas por corrimientos y truncadas por la superficie erosional Puna.	
	Volcánico Tacaza: Flujo de basaltos por debajo arcosas rojas; anglomerados de andecita y tufo dacítico por arriba.	3600
	Discordancia angular: Extensiva superposición de rocas volcánicas sobre formaciones antiguas.	
	Grupo Puno: Areniscas, roja a chocolate, arcósicas, y localmente tobáceas, conglomerados de cuarcitas y andesitas; más arriba, 1800 metros de lutitas chocolate yesíferas con bancos blancos compactos de toba volcánico cerca al tope. (Equivalente con la Fm. Corocoro de Bolivia).	7000
	Discordancia Angular: Extensiva superposición del Grupo Puno sobre rocas antiguas.	

SISTEMA CRETÁCICO	Formación Muñani: Areniscas arcósicas rojo ladrillo sin material volcánico.	800
	Formación Vilquechico: Lutitas gris oscuras, sílíceas, con más de dos capas de cuarcita blanca.	680
	Grupo Cotacucho: Areniscas masivas rosadas a rojas, sobreyaciendo e infrayaciendo por lutitas roja yesíferas, conteniendo capa de arenisca continua probablemente de origen eólico.	1100
	Discordancia y regional superposición: En Cordillera orienta, Grupo Cotacucho descansa localmente sobre rocas devónicas.	
	Grupo Moho: Principalmente lutitas, en la parte superior gris oliva oscuras, con capas grises de cuarcita, en la parte inferior, rojo ladrillo a jaspeado, conteniendo capas continuas de la Fm. Ayabacas de origen marino, no muy por encima de la base.	800
	Areniscas Huancané: Gruesas, marrón claro a rojo, con continuas capas eólicas, rangos a partir de 60 metros.	500
SISTEMA JURÁSICO	Lutitas Muni (Posiblemente más antiguas que el Jurásico Superior): Lutitas rojizas a marrones oscuras con delgadas calizas marinas fosilíferas.	135
	Formación Sipín: Calizas, muy arenosas y arcillosas sin presencia de fósiles.	20
	Discordancia Angular	
	Grupo Lagunillas: Lutitas gris a negras oscuras, calizas grises oscuras y cuarcitas grises, gradando hacia la parte superior a capas rojas, con una secuencia completa marina fosilífera.	1200
SISTEMA PÉRMICO	Discordancia angular	
	Grupo Copacabana: Calizas sílíceas masivas grises, intercaladas con lutitas rojas a grises, en la base descansa una secuencia de lutitas grises a negras oscuras parcialmente de origen no marino, localmente areniscas rojas, sin presencia de fósiles hacia el tope. (Areniscas Tiquina)	800 -1800
SISTEMA DEVÓNICO	Discordancia	
	Grupo Cabanillas: Lutitas, y en menor cantidad cuarcitas negras a gris verdosas, contacto basal desconocido.	3000
MÁXIMO ESPESOR		20 285

Fig. 13. Cuadro desarrollado por Newell D. (1949) describiendo las unidades estratigráficas que reconoció su trabajo de campo.

Con el pasar de los años, muchos autores (Audebaud, 1978; Laubacher, 1978; Palacios y Ellison, 1986; Marocco y Laubacher, 1990; Jaillard et al., 1993; entre otros) han realizado trabajos geológicos integrales y apoyados también en la columna estratigráfica de Newell, concluyeron cada uno con sus respectivas interpretaciones en los apilamientos estratigráficos que muestro a continuación (Fig. 14):

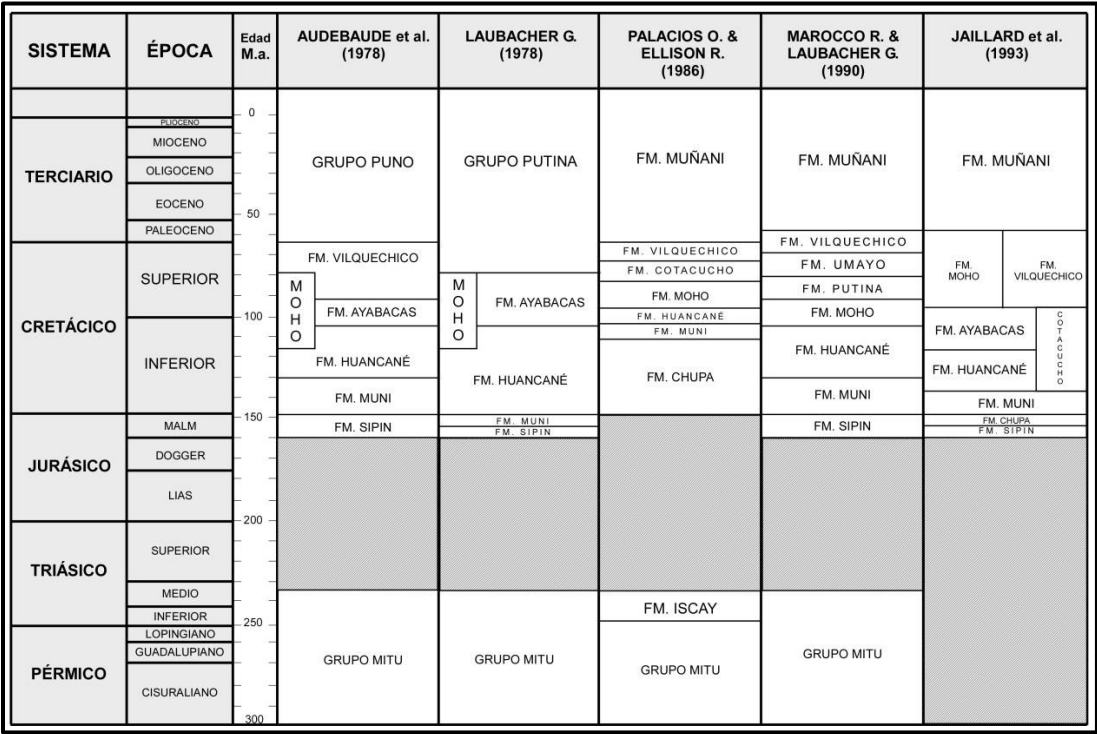


Fig. 14. Columnas generalizadas de los diferentes autores a lo largo de los años.

Paralelamente, la inversión energética en los años 90 se refleja con las compañías petroleras Yugansk Oil Company Y PetroAndes S.A., de las cuales en base a sus trabajos respectivos, extraigo la columna estratigráfica mostrada a continuación (Fig. 15) en la que apreciamos un avance sustancial en cuanto a la disposición de las unidades así como sus respectivos espesores.

24

Fig. 15. Columna estratigráfica utilizadas por las empresas PetroAndes S.A. y Yugansk Oil Company para el desarrollo de sus trabajos.

Posteriormente en el 2001, Acosta efectúa una exhaustiva revisión lito-estratigráfica para la zona sur del Perú, en la que detalla que muestro a continuación (Fig. 16); cabe indicar como principal aporte, que introduce a la secuencia sedimentaria, la unidad formacional fluvio-eólica Quilcapunco de edad Triásico - Jurásico Inferior? considerada como tal, por superposición estratigráfica; ya que sobreyace en discordancia al Grupo Mitu o en discordancia angular al Grupo Cabanillas y subyace a la formación Sipín, considerada para él, como Jurásico Inferior - Medio. (Acosta, 2001)

Otro aporte no menos importante es la división de la Formación Huancané (Jurásico Superior?) en tres miembros, uno de los cuales, presenta una base erosiva constituido por conglomerados grano-decrecientes, con clastos de cuarzo con diámetro promedio de 3 cm, inmersos en una matriz arenosa; y con presencia también de pequeños diques sinsedimentarios (Acosta, 2001) así como la modificación de la disposición de las unidades cretácicas mostradas en las columnas previas, generando un modelo de apilamiento donde los sintetiza en el Grupo Yanaoco y la Fm. Ayabacas,; menciono estos datos puesto que posteriormente será de mucha relevancia para las explicaciones a mostrar en adelante.







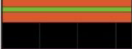

























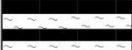

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS		LITOLOGIA	DESCRIPCION	MAGMATISMO VOLCANISMOPLUTONISMO		
CENOZOICO	NEOGENO	PLIO-CUATERNARIO		DEPOSITOS RECIENTES			Limos laminados con algunos niveles de areniscas con estratificación cruzada		
				FORMACION AZANGARO					
	PALEOGENO	MIOCENO							
		OLIGOCENO	Sup.	FORMACION AYAVIRI					
			Inf.						
		EOCENO		FORMACION MUNANI			Intercalación de limolitas rojas y areniscas granoestrato crecientes a la base se encuentra en algunos lugares una colada volcanica de naturaleza basaltica. más arriba se tiene la presencia de una unidad evaporitica denominada Miembro La Cabaña		
		PALEOCENO	SUPERIOR						
			INFERIOR						
	MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	GRUPO VILQUECHICO	FORMACION VILQUECHICO SUPERIOR				Intercalación de lutitas rojas, verdes, y moradas, en la base un delgado nivel de areniscas cuarzosas
					FORMACION VILQUECHICO MEDIO				Intercalación de lutitas rojas, verdes, negras y moradascon un nivel delgado de areniscas cuarzosas
FORMACION VILQUECHICO INFERIOR						Lutitas abigarradas			
FORMACION AYABACAS					Olistolitos de rocas calizas, areniscas y lutitas, algunas veces se tienen rocas pizarras y cuarcitas dentro de la masa de los olistolitos				
INFERIOR		GRUPO YANAOCO	Unidad Superior			Conglomerados, areniscas y limolitas estratificados, en paso progresivo a calizas grices			
			Fm. Angostura						
JURASICO		MALM	FORMACION HUANCANE			Areniscas cuarzosas y conglomerados de medio fluvial, hacia el techo areniscas cuarzosas de medio eólico			
		DOGGER	FORMACION MUNI			Intercalacion de limolitas y areniscas granoestratoecrecientes			
			FORMACION HUAMBTIC			Calizas negras masivas y laminadas interestratificadas con delgados bancos de lutitas negras			
		FORMACION SIPIN			Conglomerados con clastos de cuarcita con matriz arenosa				
TRIASICO		LIAS	FORMACION QUILCAPUNCO			Areniscas cuarzosas estratificadas, con laminaciones de ambiente eólico y fluvial			
			GRUPO MITU	Sec. IX			Limolitas, areniscas y coladas volcanicas		
				Sec. VIII			Limolitas y areniscas granoestratoecrecientes		
		Sec. VII			Conglomerados con clastos de cuarcita dentro de una matriz arenosa				
		Sec. VI			Limolitas de color anaranjado				
		Sec. V			Calizas gris oscuras masivas algo fosilíferas				
		Sec. IV			intercalacion de limolitas y areniscas				
		Sec. III			Yesos de color blanco, a la base limolitas de color rojo				
	Sec. II				conglomerados con clastos de calizas				
	Sec. I				Olistolitos de rocas pizarras, intercalacion de limolitas y areniscas				
	PERMICO	Superior	GRUPO TARMA-COPACABANA	Formación Copacabana			Calizas grices fosilíferas, abundantes cherts, lutitas negras fosilíferas		
		Inferior		Formación Tarma			Areniscas de color verde		
Superior									
Inferior		GRUPO AMBO			Areniscas y conglomerados con matris limosa micacea				
PALEOZOICO	Siluro-Devoniano		GRUPO CABANILLAS			Pizarras negras intercaladas con cuarcitas de color blanco			

Fig. 16. Columna Estratigráfica desarrollada por Acosta H. (2001).

En la década pasada, diversas compañías petroleras tales como Yukos Oil Company (2002 - 2003) y Siboil del Perú (2006) interesadas en los lotes petroleros de la Cuenca Titicaca, antiguos Bloque 105 y Bloques S2 - S4 respectivamente (Fig. 17), realizaron trabajos de exploración geológica y geofísica; con la finalidad de evaluar el potencial petrolífero de la zona, poniendo en manifiesto sus interpretaciones estratigráficas en este apartado (Fig. 18). Cabe señalar que ambas compañías comparten la misma disposición de la pila sedimentaria, pero con distinta distribución de las unidades estratigráficas añadiendo datos geoquímicos y geofísicos de mucha relevancia en la zona de estudio.

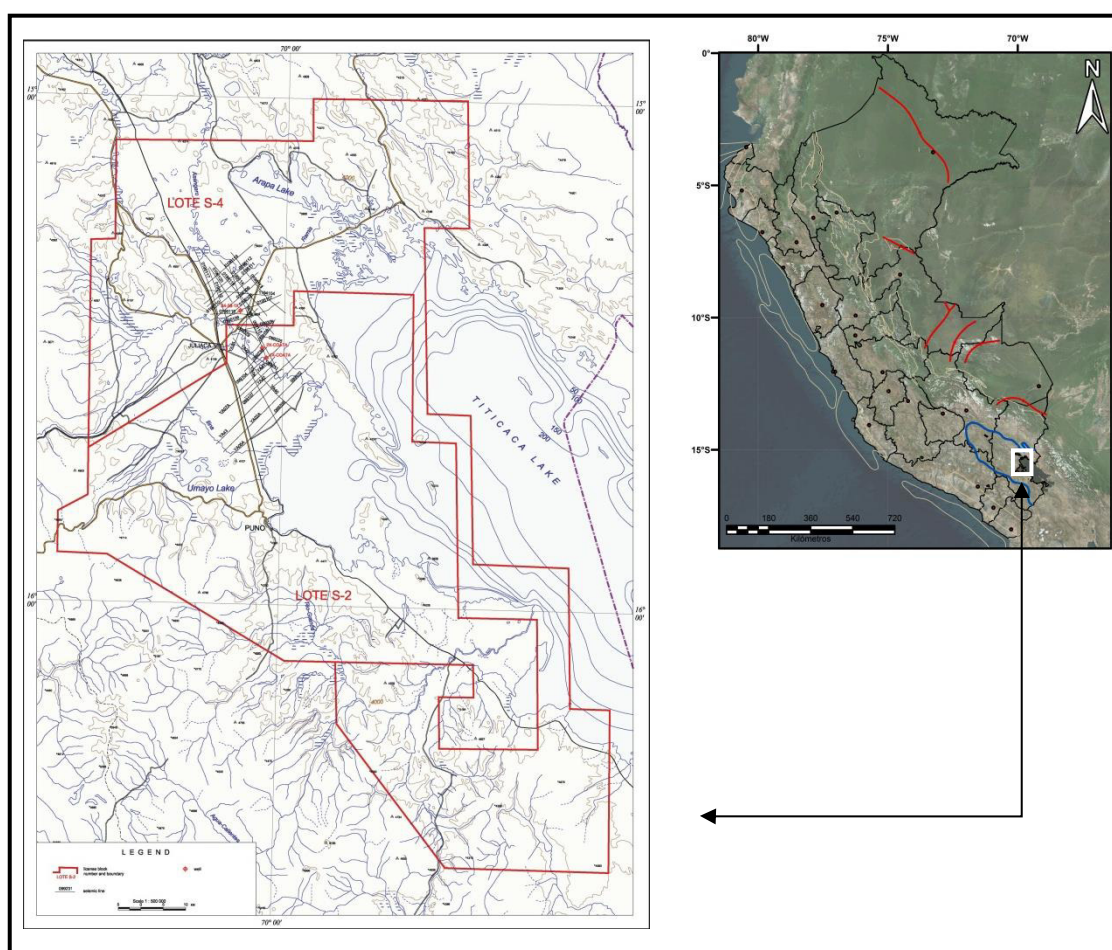


Fig. 17. Ubicación de los antiguos lotes de contrato (Yukos Oil Company, 2003).

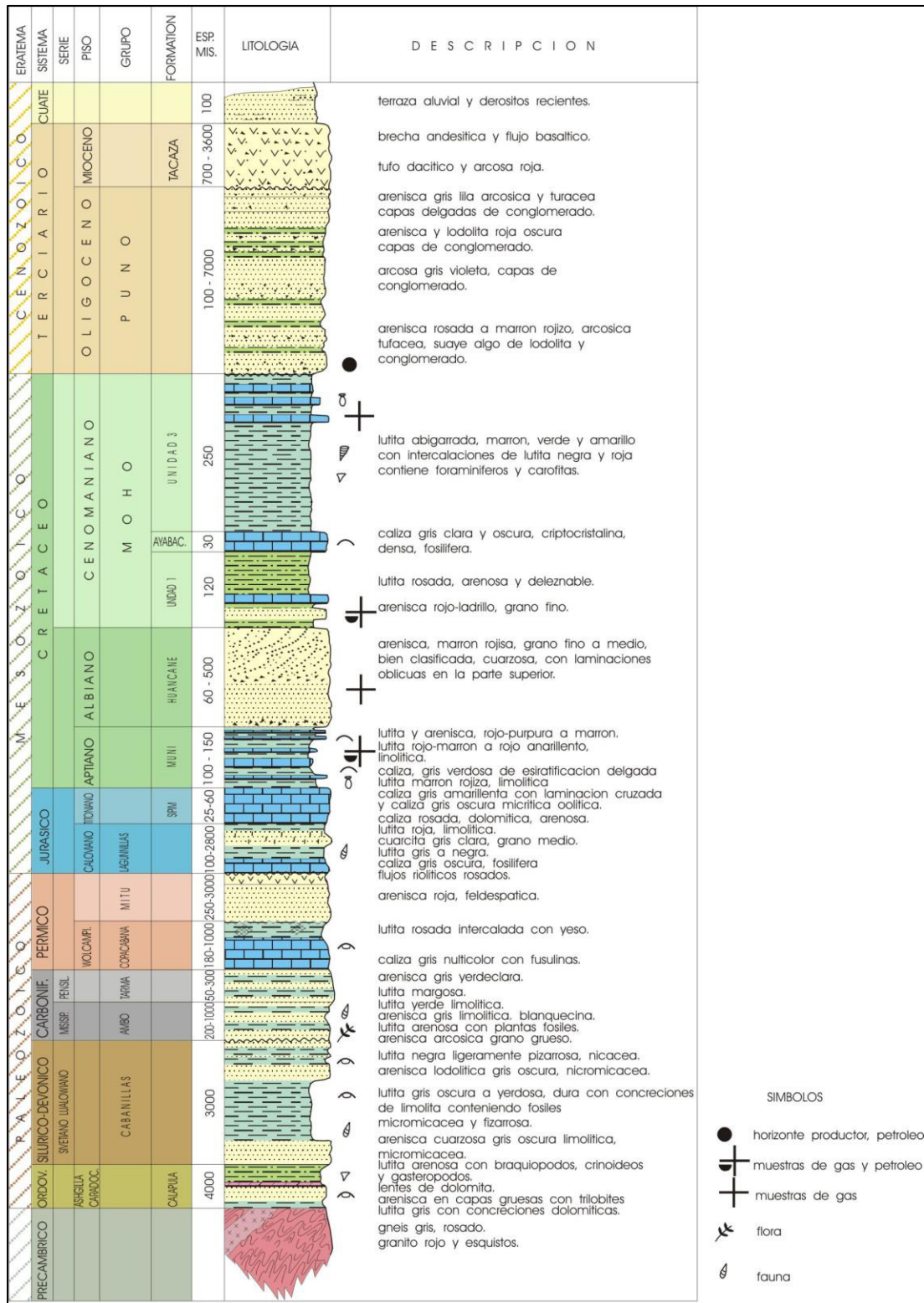


Fig. 18. Columnas estratigráficas empleadas por las empresas Yukos Oil Company y Siboi del Perú (2006).

En paralelo a la inversión petrolera, Sempere et al. (2004) realiza importantes contribuciones a la disposición de la pila sedimentaria generando modelos de distribución tectono-estratigráficas ilustrados en un corte transversal Mollendo - Putina (Fig. 19) basado en detallados trabajos de campo y contrastados con dataciones recolectadas; genera a su vez una columna estratigráfica donde divide al Grupo Yanaoco, en las Formaciones Arcurquina, Murco y Angostura, así como reasigna las edades de las unidades estratigráficas tanto jurásicas como cretácicas; mientras que por su parte Callot (2008) en su tesis doctoral muestra una evaluación exhaustiva de la Formación Ayabacas, precisando su edad y a su vez, explicando su actual distribución así como la caótica morfología que presenta atribuyéndolo a un gigante colapso submarino; cabe señalar que a su vez aporta una columna estratigráfica generalizada en la cual detalla su análisis así como información previa (Fig. 20).

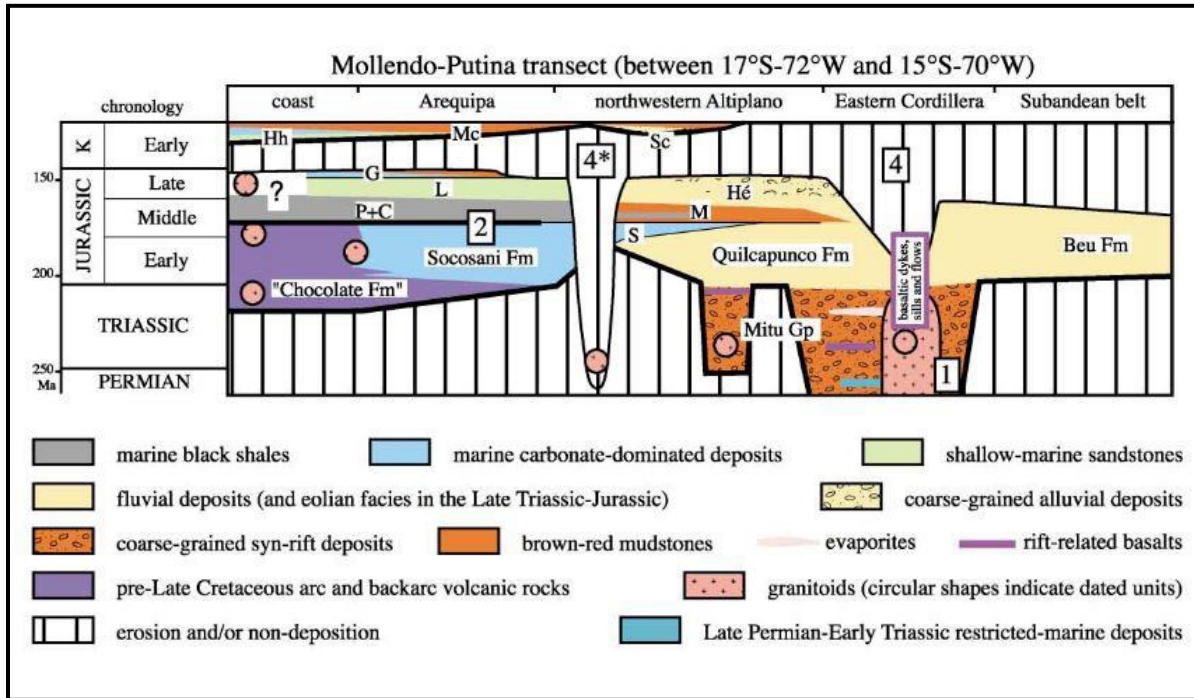


Fig. 19. Distribución de las unidades sedimentarias a lo largo de la transecta Mollendo - Putina (Sempere, 2004).

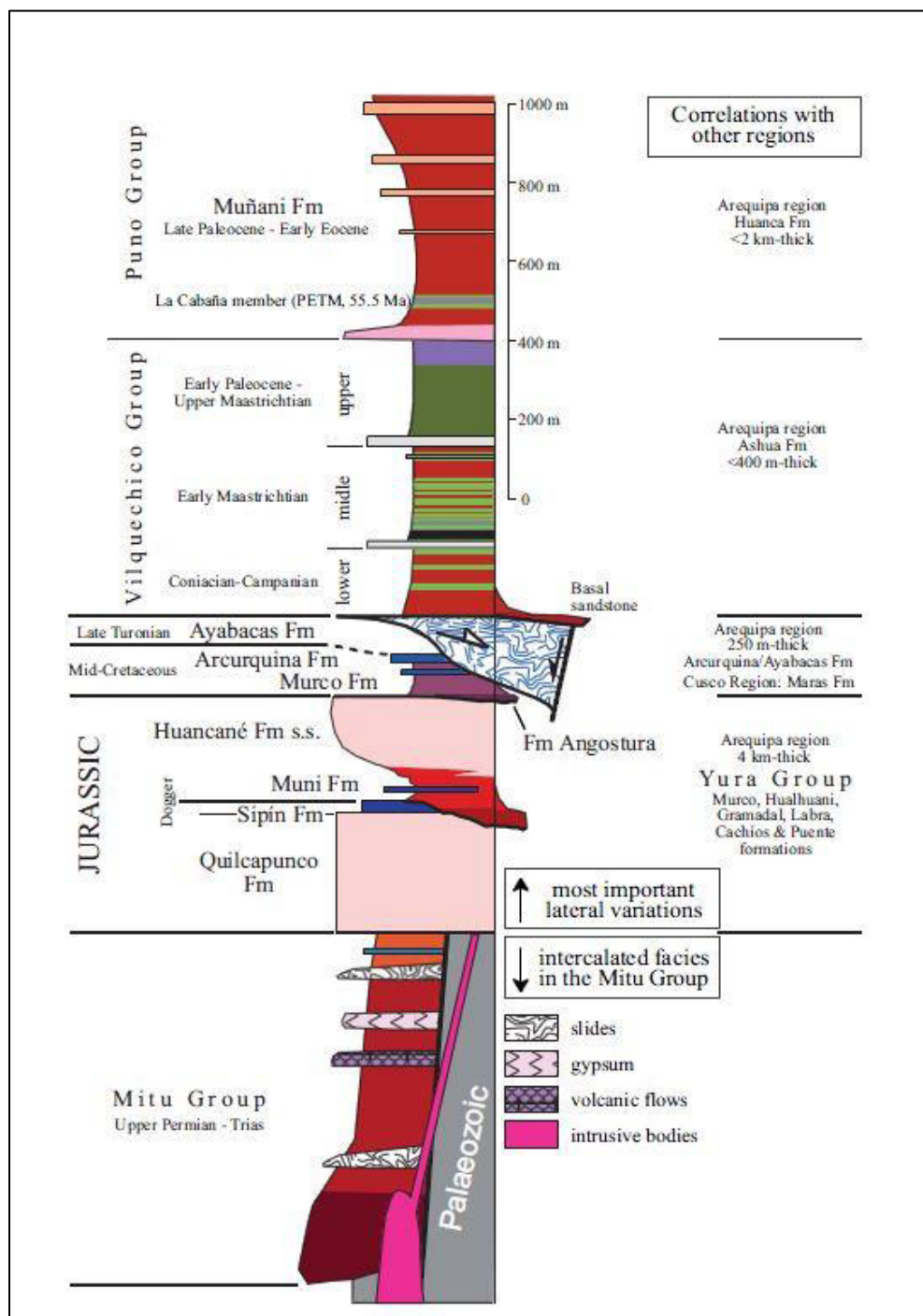


Fig. 20. Columna estratigráfica desarrollada por Callot (2008).

Finalmente, he preferido tocar en separado, la contribución de Hermoza (Perupetro, 2008) para el entendimiento geológico del área, apoyándose en los trabajos previos así como con sus interpretaciones estratigráficas sirviendo en la actualidad para tratar de comprender tan compleja zona con la finalidad de generar oportunidades de desarrollo energético. Es necesario indicar como principal aporte la inserción de la secuencia Pérmico Superior - Triásico en el área de estudio, muy semejante a los ya productores niveles ubicados en Ucayali Sur, Camisea; así como sus descripciones de las demás unidades sedimentarias; todas éstas reflejadas en su columna de disposición estratigráfica. (Fig. 21)

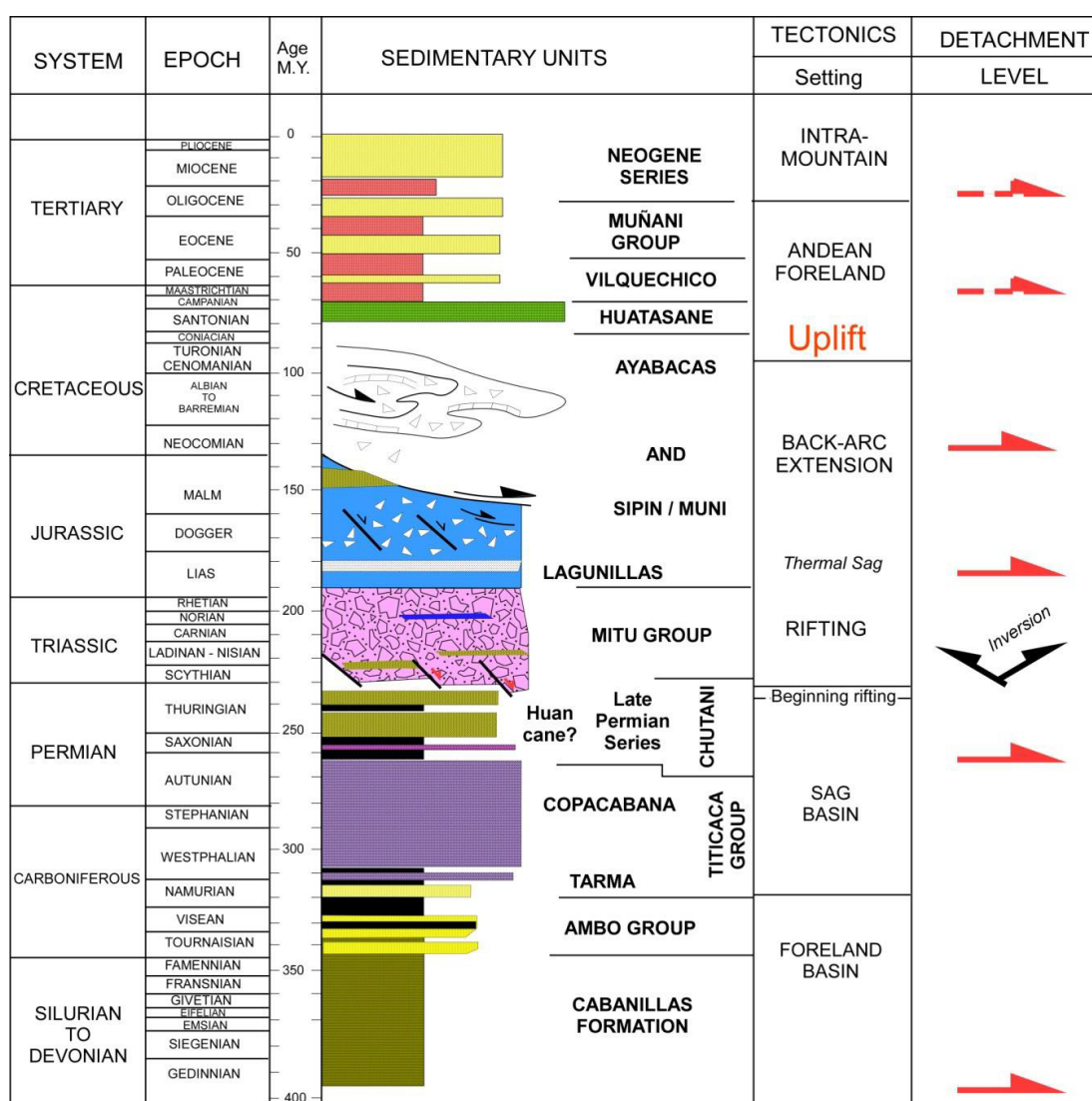


Fig. 21. Columna estratigráfica de Hermoza (Perupetro S.A., 2008).

Como se demuestra, antes del desarrollo de este trabajo no existe un consenso integral acerca de la disposición y distribución de las unidades estratigráficas de la zona, a pesar de que existen dataciones para algunas formaciones (Fig. 22), existen sendas discrepancias en muchas otras, por ende considero necesario poder discernir un nuevo modelo que compile las interpretaciones previas y obviamente apoyado en un trabajo de campo minucioso, concluir en una nueva columna y diagrama litoestratigráfico integrado que pueda ser correlacionable con los eventos tectónicos que han sido preponderantes en la distribución de la pila sedimentaria de la zona sin olvidar que es necesario involucrarlos con los elementos del sistema petrolero para generar una mejor visión del potencial hidrocarburífero de la zona.

UNIDAD	EDAD	DATACIÓN	AUTOR
Gpo. Cabanillas	Siluro-Devónica	Bioestratigrafía (<i>Trilobites</i> - <i>Conularia</i> sp.)	Acosta, 2001
Gpo. Ambo	Carbonífero Inferior	Bioestratigrafía (<i>Fauna característica</i>)	Laubacher, 1978
Fm. Copacabana	Pérmico Inferior	Bioestratigrafía (<i>Fusulinidas</i>)	Newell et al., 1953
Fm. Chutani*	Pérmico Superior	Asociación Palinológica	Vieira et al., 2004
Fm. Sipín	Triásico Superior - Jurásico Medio	Bioestratigrafía (<i>Equínidos</i> - <i>Diademopsis</i> sp.)	Sempere et al., 2000
Fm. Muni	Jurásico Medio - Jurásico Superior	Bioestratigrafía (<i>Fauna característica</i>)	Newell, 1949; Sempere et al., 2000
Fm. Ayabacas	Cretáceo Superior	Bioestratigrafía (<i>Fauna característica</i>)	Callot, 2009
Gpo. Vilquechico	Cretáceo Superior - Paleógeno	Bioestratigrafía (<i>Fauna característica</i>)	Jaillard et al., 1991

*La Fm. Chutani es el correspondiente lateral del Gp. Ene, para el lado boliviano.

Fig. 22. Dataciones compiladas de las unidades formacionales del área de estudio.

2.2.2. Modelos estructurales

Así como es complicado conciliar interpretaciones estratigráficas de la zona, debido a la alta complejidad geológica que presenta; es también motivo de discusión permanente, evaluar y poder concluir en un modelo estructural que sintetice los distintos modelos regionales del área en cuestión. A continuación detallo la evolución de los principales trabajos que buscaron precisar mediante secciones esquemáticas y/o estructurales el área del estudio actual.

Como primer apartado, muestro una recopilación de secciones esquemáticas que los distintos geólogos, enfocados en dar una explicación estructural del área, contribuyeron con sus respectivas interpretaciones; cabe indicar que dichos cortes están limitados al Área de Pirin, el ya conocido yacimiento petrolífero del siglo pasado. (Fig. 23)

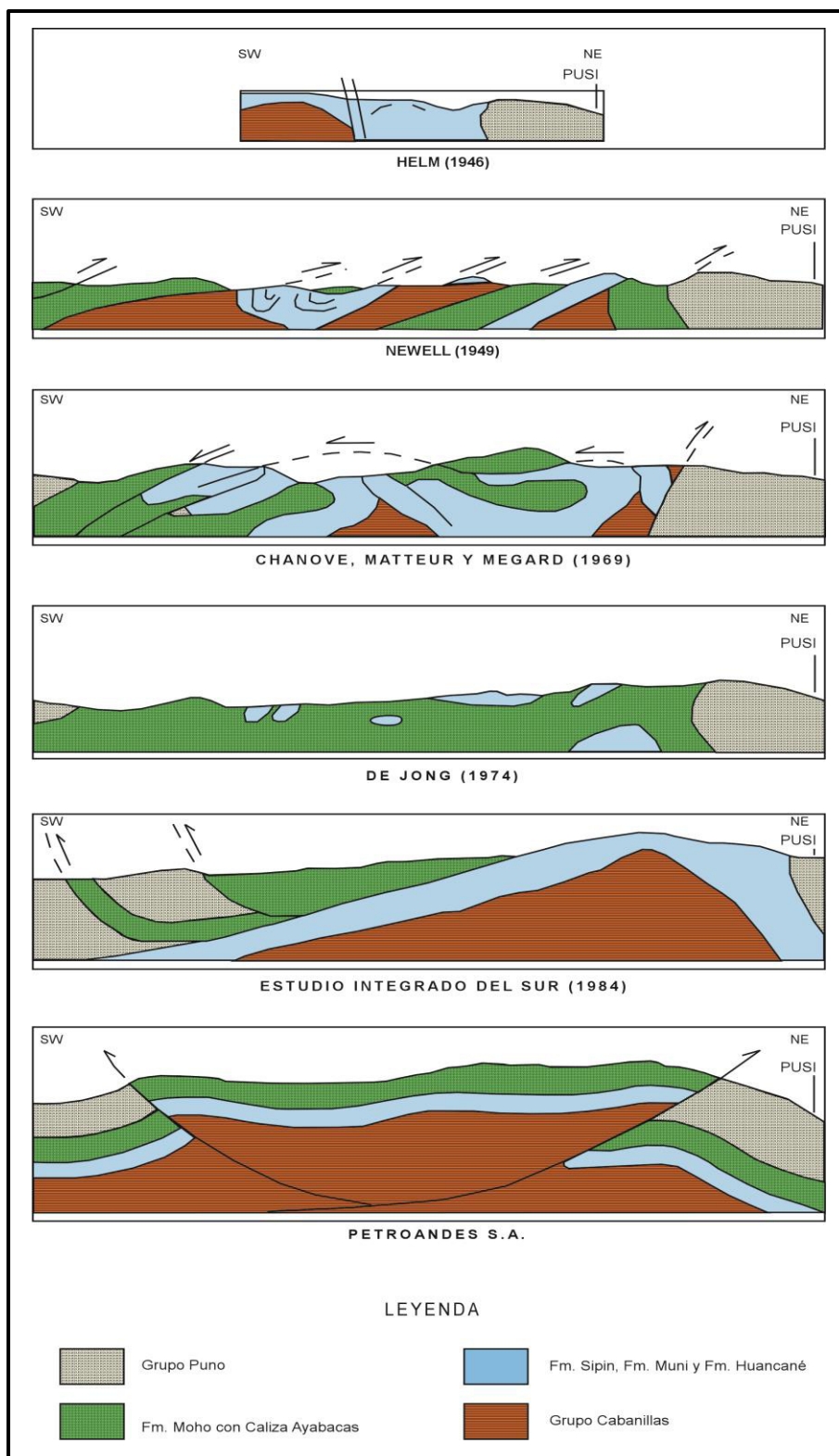


Fig. 23. Evolución de las interpretaciones estructurales del Área de Pirin.

Ya en la década pasada, geólogos como Acosta (2001) así como la empresa estatal Perupetro S.A. muestran cortes regionales los cuales abarcan un mayor rango de dimensión superficial y tratan de explicar así, las relaciones entre las estructuras aflorantes con elementos tectónicos activos.

A continuación muestro una de las secciones esquemáticas de Acosta, en la que apreciamos una división de dominios tectónicos dentro del área de estudio; dominio suroeste, dominio central, dominio noreste (Fig. 24); siendo lo más resaltante la ubicación en la parte central de una faja plegada y corrida que cesa su avance hacia el Lago Titicaca; es bueno acotar también que muestra hacia el noreste, una estructura inferida (a la fecha, no se tiene información sísmica en esa área) en el subsuelo asociándolo él, a una inversión tectónica (Acosta, 2001). Por el lado más occidental, apreciamos una serie de fallas que no guardan relación con los otros dos dominios, aduciendo que trata de representar que están condicionados por dos factores de deformación distintos.

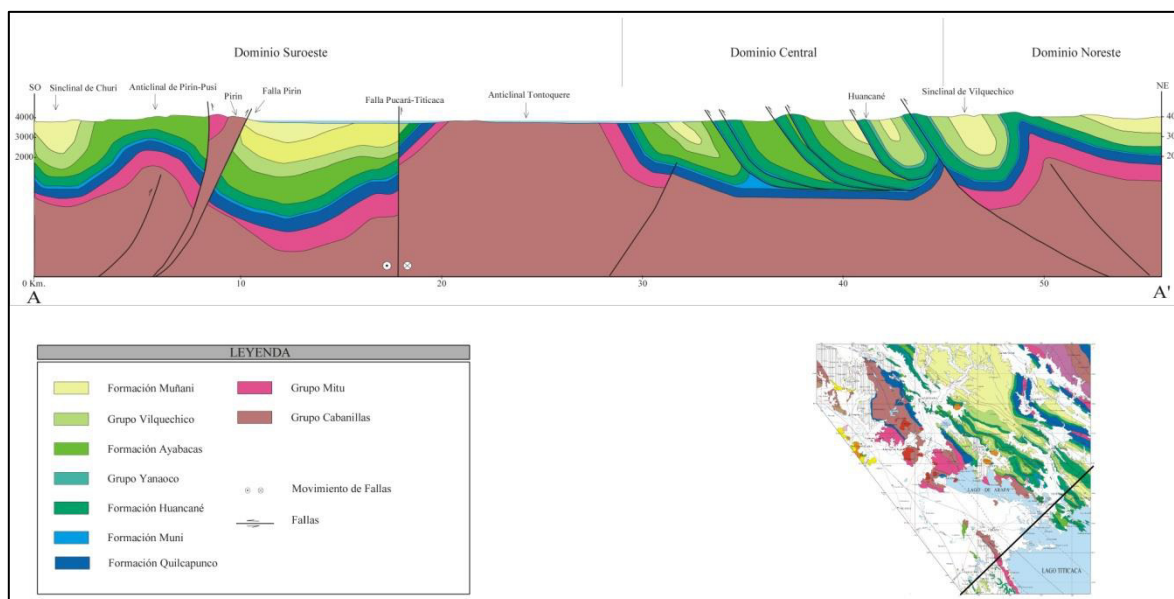


Fig. 24. Sección estructural desarrollada por Acosta (2001).

Posteriormente Perupetro S.A. (Infologic, 2006) publica una sección regional esquemática (Fig. 25) abarcando las principales morfoestructuras del área de estudio, resaltando que para el mencionado trabajo el Grupo Mitu aflora únicamente en la Cordillera Oriental, pero infieren que se encuentra en el subsuelo condicionando el tipo de deformación tanto para el lado oriental como parte del lado occidental de su sección. Se puede extraer también que existe el cese de la deformación hacia el Lago Titicaca, de las secuencias de inversión progradantes hacia el oeste. A su vez consideran que el lado oeste obedece a otros agentes involucrados en el condicionamiento de las estructuras en superficie.

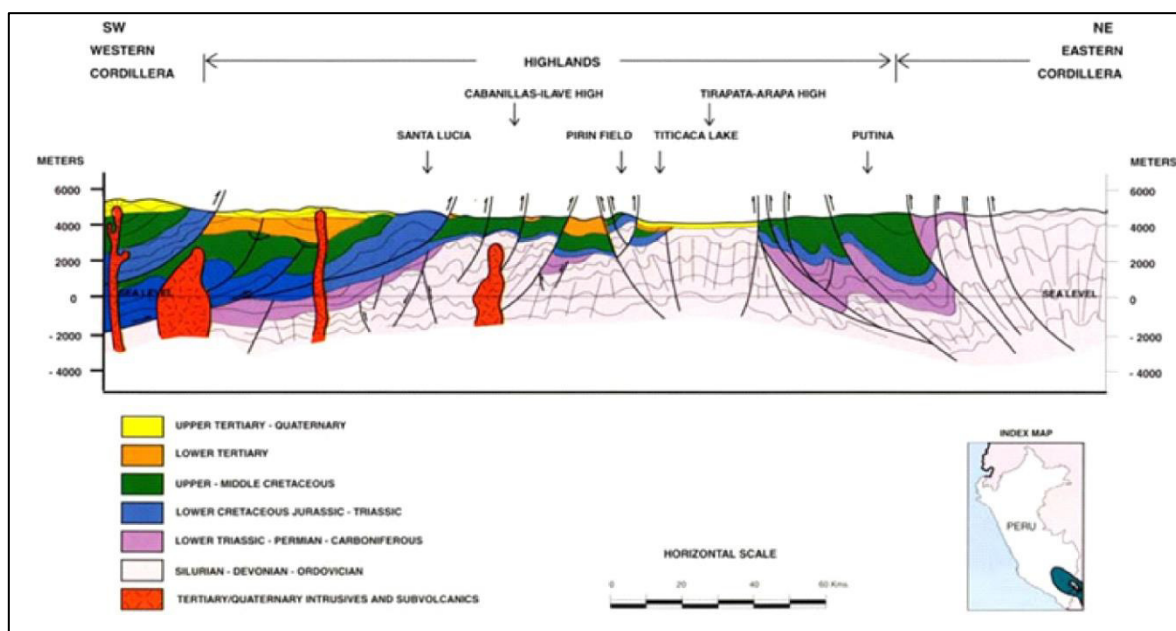


Fig. 25. Sección estructural publicada por Perupetro S.A. (Infologic, 2006).

Concluyendo con el recuento, cito el trabajo realizado por Hermoza (Perupetro S. A., 2008) en que su interpretación estructural muestra que la parte oriental de la cuenca Titicaca corresponde a la Faja Plegada y Fallada del Altiplano, mientras el borde occidental de la cuenca corresponde al sistema invertido rift Permo - Jurásico (Fig. 26). Cabe indicar que dicho trabajo abarca también el desarrollo de una sección estructural (Fig. 27), en la que extraemos también la nula presencia en superficie del Gp. Mitu (pero sí presente en su interpretación del pozo Coata 1X) condicionante en el tipo de deformación (sistema de piel gruesa) para su análisis de la parte occidental de la zona.

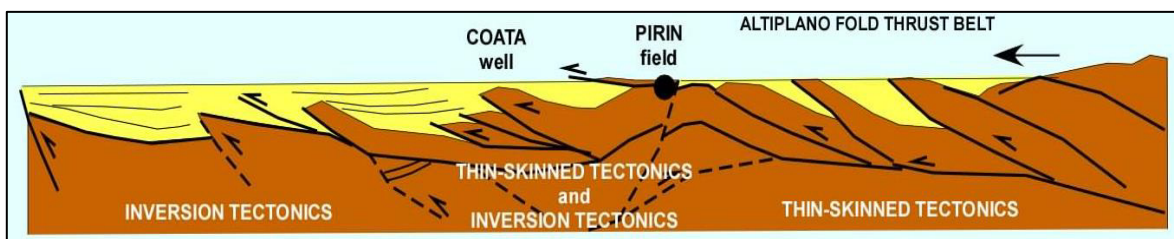


Fig. 26. Sección esquemática desarrollada por Hermoza (Perupetro S.A., 2008)

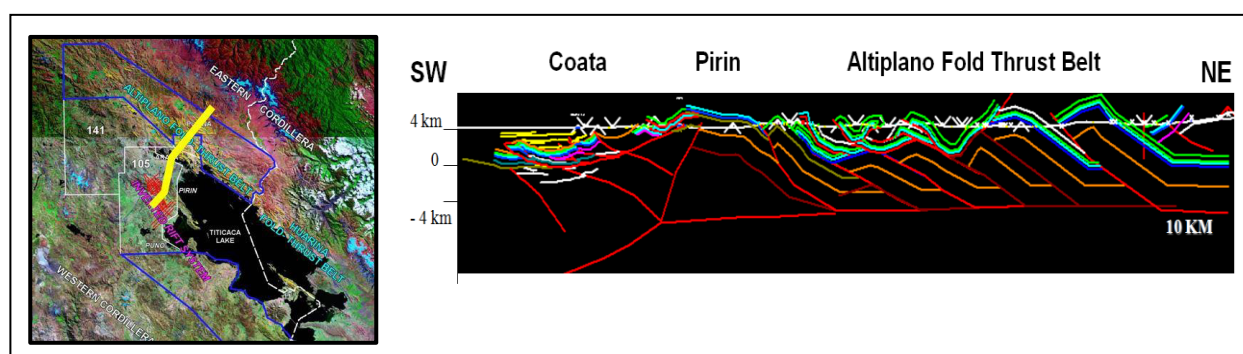


Fig. 27. Sección estructural desarrollada por Hermoza (Perupetro S.A., 2008)

Como hemos podido leer, las diferentes interpretaciones estructurales muestran sendas dudas con respecto a entender claramente la deformación existente en la zona; como una somera conclusión podemos decir que los autores que me preceden no pudieron vincular el lado occidental y oriental del corte, puesto que dedujeron que se tratara de dos estilos de deformación u otros se apoyaron en sus trabajos de campo para inferir inversiones tectónicas poco correlacionables con las posibles estructuras en profundidad. Por estos y otros argumentos, es necesario establecer un modelo que trate de esclarecer la incertidumbre existente y poder llegar a conciliar las diferentes exégesis de los trabajos precedentes.

CAPÍTULO III. REVISIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LA CUENCA TITICACA

3.1. INTRODUCCIÓN	38
3.2. DATOS DE CAMPO	38
3.2.1. Recopilación De Campañas De Campo Precedentes	38
3.2.2. Fieldtrip 2014: IRD - YPFB.....	41
3.3. DATOS DE SUBSUELO.....	54
3.3.1. Pozo Ayabacas 1X.....	55
3.3.2. Pozo Coata 1X.....	57
3.3.3. Pozo RH - 1	60
3.4. NUEVO MODELO ESTRATIGRÁFICO	64
3.4.1. Columna Estratigráfica Generalizada.....	64
3.4.2. Correlaciones Estratigráficas Pozos - Afloramientos.....	65
3.5. NUEVO DIAGRAMA LITOESTRATIGRÁFICO PROPUESTO.....	68

CAPÍTULO III. REVISIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LA CUENCA TITICACA

3.1. INTRODUCCIÓN

En base a lo expuesto en el capítulo anterior, podemos dilucidar que a la fecha existe mucha controversia en función a la disposición de las unidades sedimentarias en el área de estudio. Por tal motivo, es necesario realizar una reevaluación de los datos bibliográficos que han sido presentados, así como integrarlo, con la adquisición de datos de campo desarrollada en el presente capítulo e información clave del subsuelo, para generar correlaciones estratigráficas que expliquen la distribución de las unidades formacionales así como proponer un nuevo diagrama lito-estratigráfico del Altiplano Peruano.

3.2. DATOS DE CAMPO

3.2.1. Recopilación De Campañas De Campo Precedentes

3.2.1.1. *Fieldtrips* IRD - PERUPETRO S.A. (2006 - 2007)

En los años 2006 y 2007, la empresa estatal PERUPETRO S.A., conjuntamente con el IRD realizaron un primer relevamiento geológico en las áreas de Arapa, Asilo, Ayabacas, Azángaro, Huancané, Juliaca, Lagunillas, Mañazo, Pirin y Pucará (Fig. 28) con la finalidad de analizar el potencial exploratorio por hidrocarburos de la Cuenca del Titicaca. Los trabajos realizados en esta campaña de campo fueron enfocados en generar nuevos datos estructurales, estudiar las características sedimentológicas, análisis de facies, estilos de deformación y contexto geodinámico regional, analizar secuencias sedimentarias con potencial para generar hidrocarburos rocas reservorio y sellos, y así como también adquirir muestras para termocronología, geoquímica (Ro, TOC, Pirólisis Rock Eval) y petrofísica. (PERUPETRO S.A., 2008).

Como datos relevantes del desarrollo de estos *fieldtrips*, se pudo identificar rocas con gran potencial generador de hidrocarburos pertenecientes al Jurásico Medio (Formación Lagunillas) así como recomendar análisis geoquímicos de lutitas del Grupo Cabanillas para determinar su grado de madurez termal. A su vez rescatamos el reconocimiento de secuencias de areniscas eólicas con excelentes condiciones de roca reservorio de posible edad Triásica - Jurásica?. Como así también, la identificación de *emanaciones de hidrocarburo* (Foto 1), con lo que podemos argumentar que nos encontramos en un sistema petrolero activo; entre otros datos destacables que han servido de mucha ayuda para el desarrollo del presente trabajo.

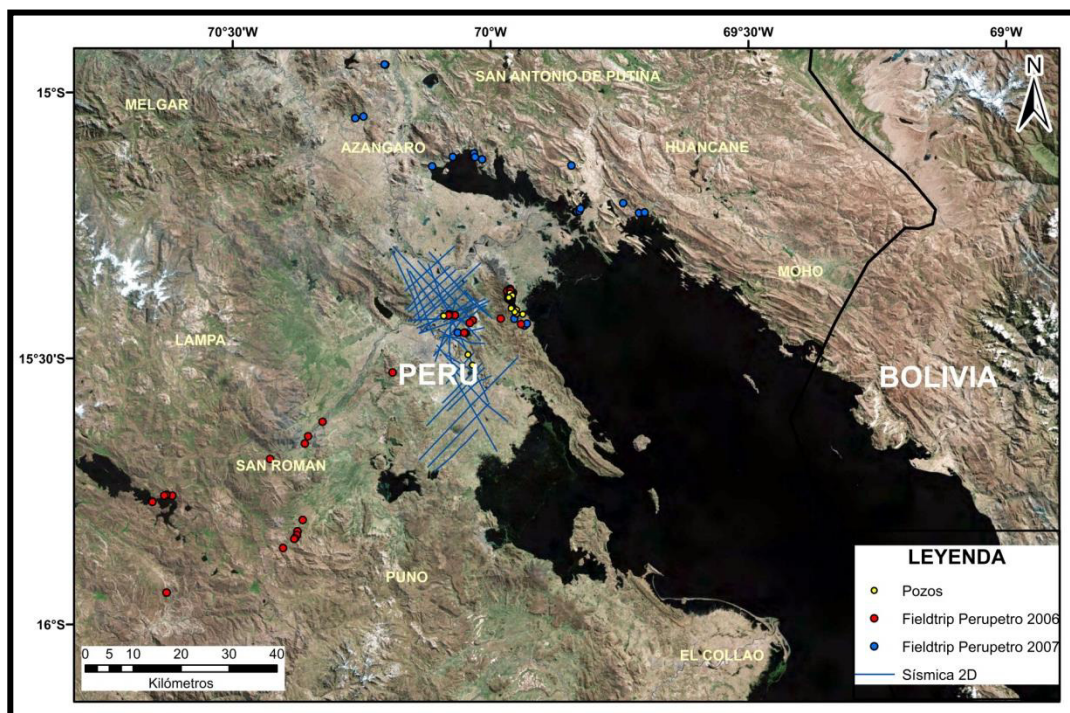


Fig. 28. Área de extensión de los fieldtrips desarrollados por PERUPETRO S.A. en el 2006-2007.



Foto 1. Imagen mostrando seep gas a lo largo del recorrido del Fieldtrip 2006.

Podemos extraer también, del desarrollo de estas campaña de campos, la caracterización de las numerosas formaciones aflorantes en el área, así como el especial interés en la Formación Huancané (Cretácico Inferior –en discusión-) puesto que reafirman las excelentes condiciones que presenta como reservorio en base a su constitución de areniscas eólicas al tope (Foto 2); como así también su gran extensión regional.

Es necesario indicar que las referencias de ambos *fieldtrips*, son consideradas aportes preponderantes para poder sustentar nuestras nuevas interpretaciones, y generarnos una significativa base de datos que apoyados en nuestro estudio actual, nos permite evaluar la prospectividad de la cuenca.



Foto 2. Imagen mostrando el potencial reservorio de las secuencias continentales de la Fm. Huancané.

3.2.2. Fieldtrip 2014: IRD - YPFB

Como parte del proyecto de tesis, se organizó una campaña de campo con la finalidad de registrar un análisis geoquímico, tectónico y sedimentario de la Cuenca del Altiplano, abarcando también la parte Norte de Bolivia, para la cual tuvimos el apoyo de la empresa estatal de dicho país, Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos -YPFB.

En la mencionada salida, realizada en el mes de Julio del 2014, pudimos estudiar 120 afloramientos (Fig. 29), a lo largo de ambos países, siendo de vital importancia para integrar a nuestra información que manejábamos y obtener una idea regional del comportamiento tectónico - sedimentario que condiciona la morfología actual de la Cuenca del Altiplano.

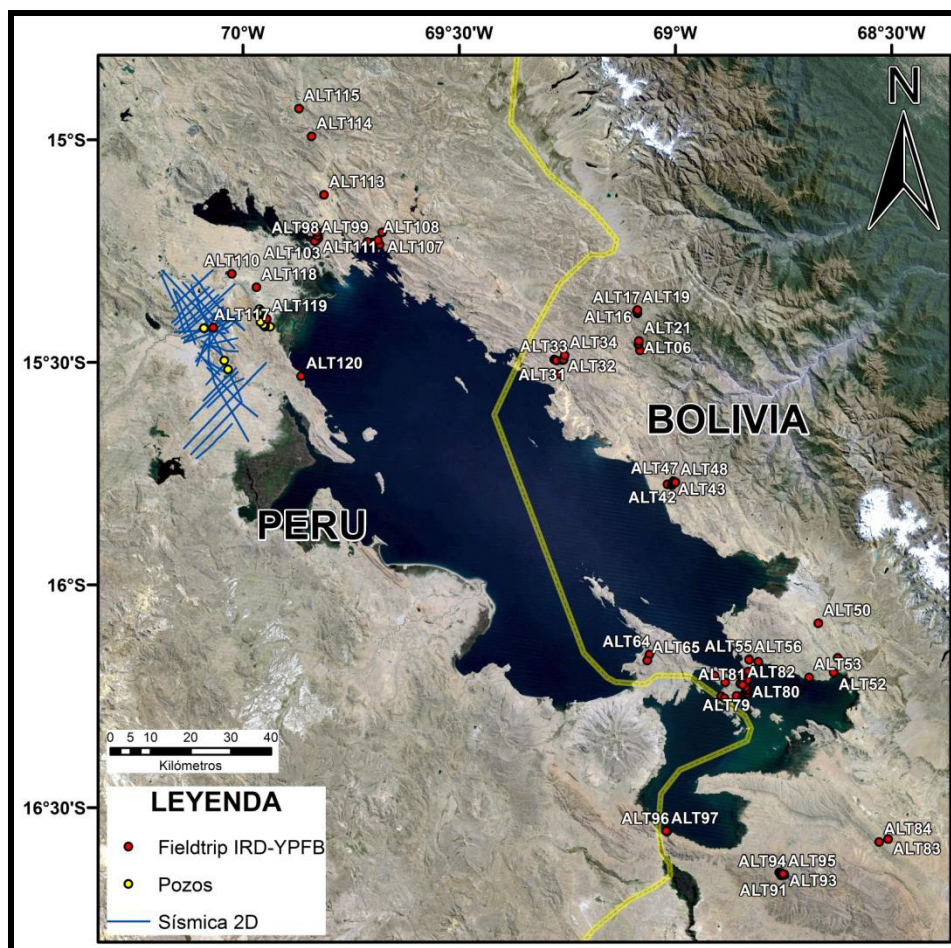


Fig. 29. Recorrido del Fieldtrip IRD - YPFB 2014.

Es necesario indicar, que paralelamente al relevamiento geológico, extrajimos muestras para análisis de termocronología (AFTA) para identificar los eventos de levantamiento tectónico, reflectancia de vitrinita - análisis de roca madre (*Rock Eval*) para evaluar las zonas de generación de hidrocarburos, dataciones radio cronológicas (zircón, biotita, glauconita) sobre rocas sedimentarias y volcánicas, dataciones bioestratigráficas y también procedencia sedimentaria, muy útil para establecer modelos de evolución tectónica y paleogeográfica de las cuencas sedimentarias y terrenos tectono-estratigráficos.

El desarrollo del *fieldtrip*, fue dividido en 06 secciones (Fig. 30) para realizar un análisis más enfocado en los objetivos trazados; cabe indicar que de estas secciones, 03 se ubican muy cercanas a la frontera, mientras que las otras 03 restantes quedaron definidas tanto al norte (Perú) como al sur (Bolivia) del Lago Titicaca.

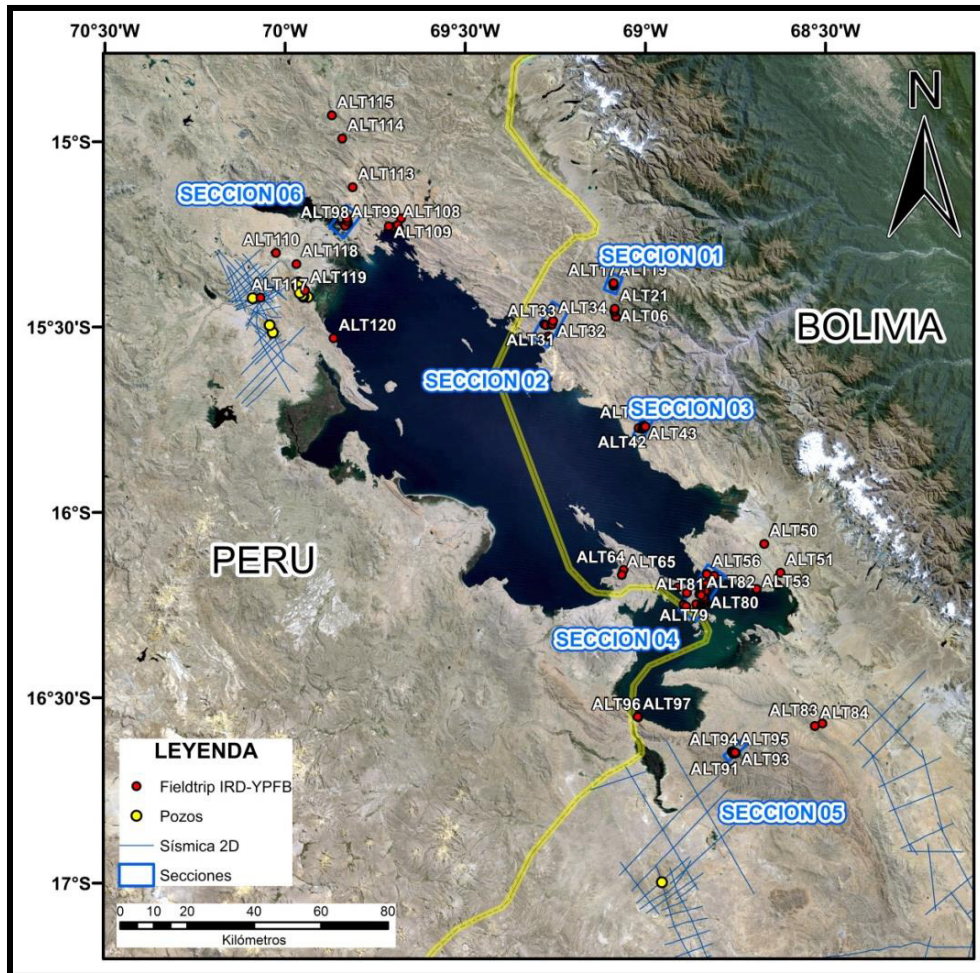


Fig. 30. Secciones desarrolladas en el Fieldtrip 2014

A continuación detallaremos las secciones que tienen mayor implicancia en el desarrollo del presente trabajo, puesto que a la fecha y debido a que es un trabajo bilateral (Bolivia - Perú) sólo podemos enfatizar en la información que amerite ser presentada en el análisis de este proyecto.

La primera sección mostrada (Fig. 31), se ubica en el Estrecho de Tiquina (Frontera Perú - Bolivia), resaltando dentro de las secuencias aflorantes, la presencia de una unidad del Pérmico Superior datada por asociación de fósiles de plantas (Fig. 32) por Vieira et al. (2004). Esta secuencia muestra mucha similitud con las ya conocidas unidades del Grupo Ene en Camisea y Madre de Dios, y que nos sirvió de base para poder fundamentar nuestras correlaciones litoestratigráficas mostradas más adelante.

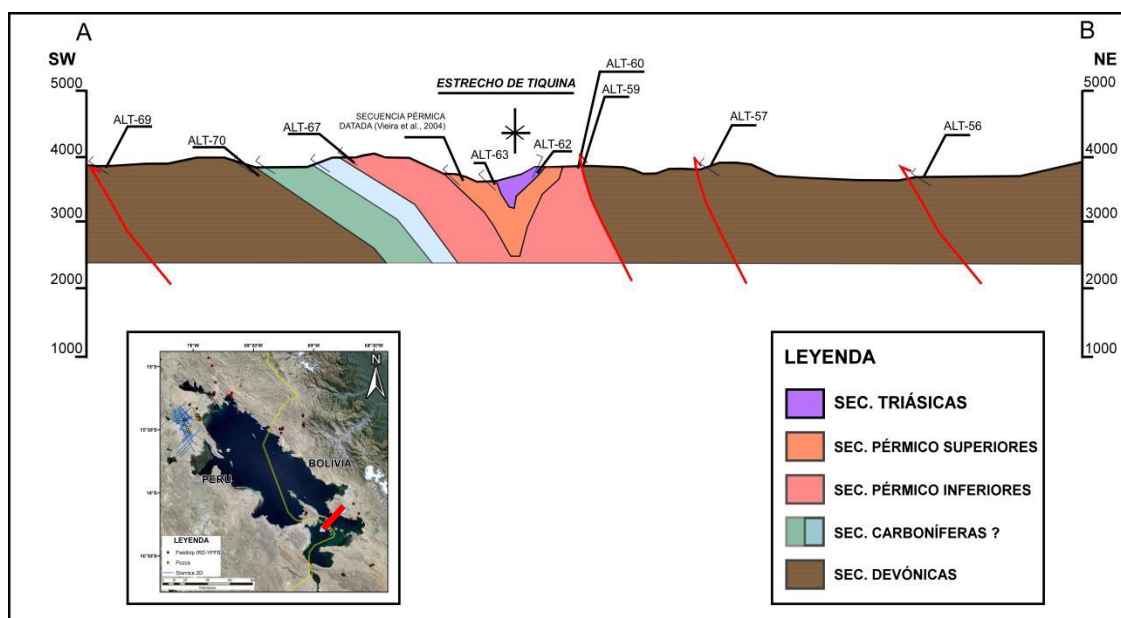


Fig. 31. Sección estructural esquemática descrita en el Estrecho de Tiquina.

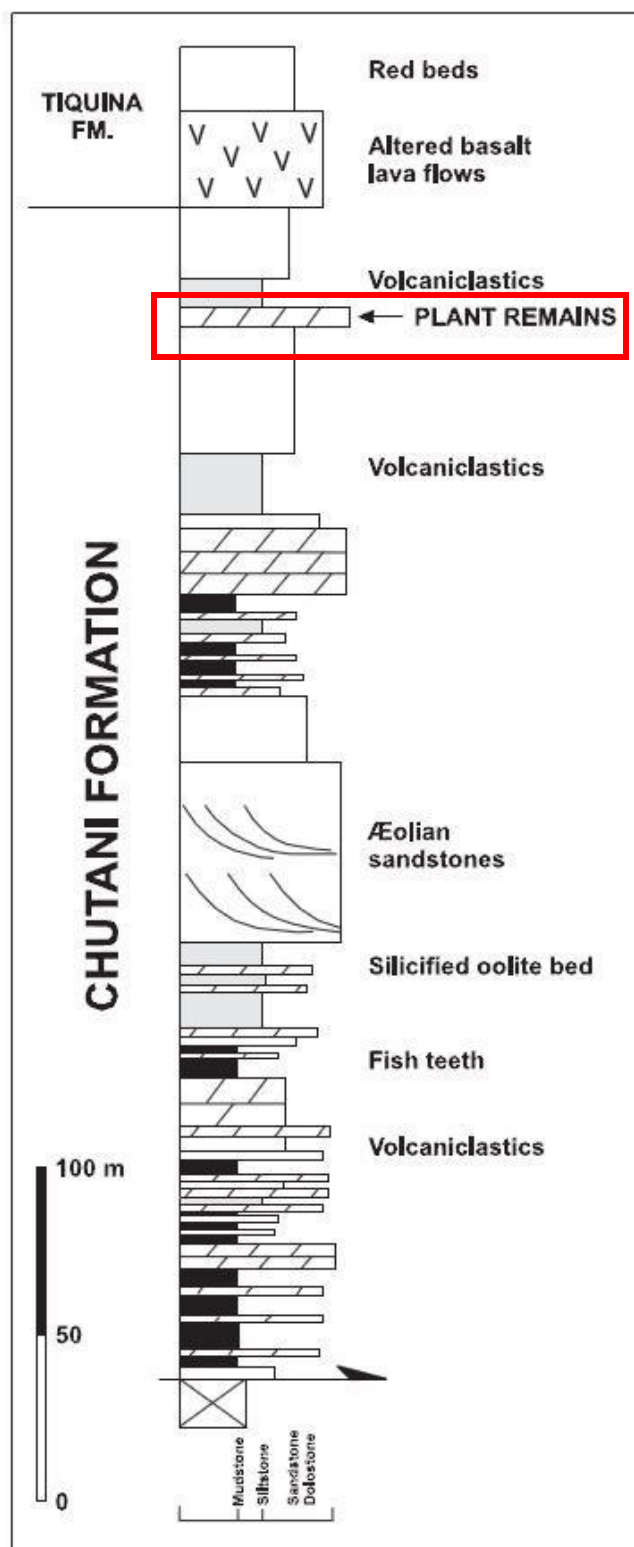


Fig. 32. Columna descrita por Vieira et al. (2004) en el Estrecho de Tiquina, señalando la secuencia objeto de datación.

Hacia al este del Estrecho de Tiquina (Fig. 33), se muestra un apilamiento pre-cretácico importante, mostrando secuencias devónicas pelíticas a la base en contacto discordante con secuencias calcáreas del Grupo Copacabana, ambas evidenciando estratos de crecimiento (Fig. 34 y 35); suprayeciendo a éstas, niveles pérmicos superiores correlacionables con los ya conocidos en el subandino peruano, presentando en su base secuencias de lutitas negras con delgadas intercalaciones de calizas (Ene Shale?), suprayeciendo una potente secuencia de areniscas eólicas de al menos 70 m (Ene - Noi?), y sobre ésta una secuencia de pelitas intercaladas con calizas y dolomitas, posiblemente correlacionable con la formación Shinai de aprox. 50 m; hacia el tope de la secuencia se encuentran bancos potentes de areniscas sublíticas de grano fino a medio, con intercalaciones de niveles volcánicos asociado a la formación Quilcapunco o Lower Nia, para el Perú.

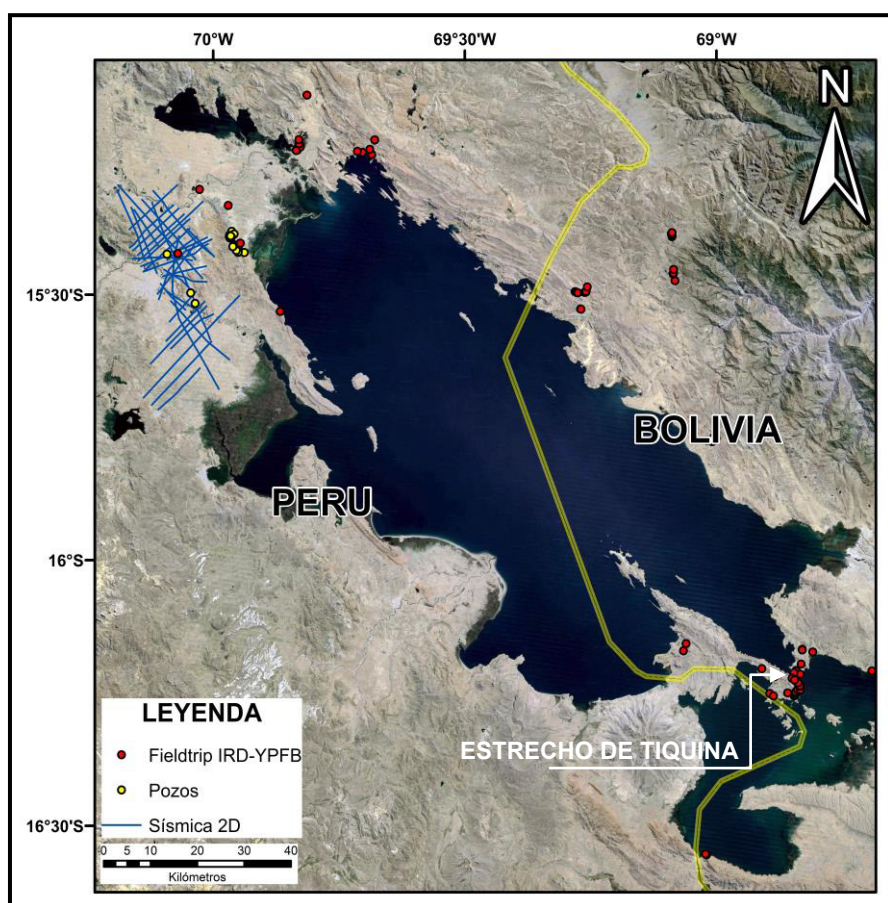


Fig. 33. Ubicación del trabajo de campo desarrollado en el Estrecho de Tiquina.

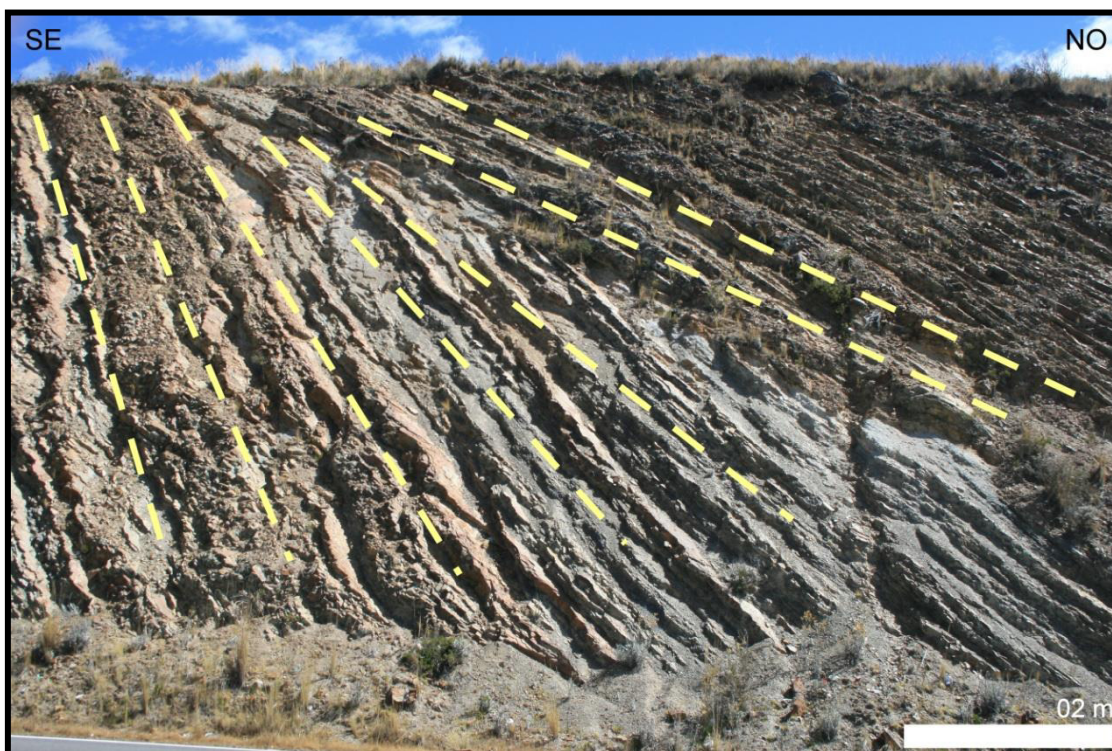


Fig. 34. Secuencias devónicas mostrando estratos de crecimiento, evidencia una actividad tectónica en esta época (ALT-57).



Fig. 35. Secuencias granodecrecientes pérmicas aflorantes en el Estrecho de Tiquina. Nótese que se registra actividad sin-tectónica evidenciada en los estratos de crecimiento mostrados (ALT-58).

Hacia el borde oeste del Estrecho de Tiquina (Fig. 33), nos encontramos nuevamente con las secuencias pérmicas, caracterizadas por la presencia de calizas grises oscuras (Foto 3) de un espesor aproximado de 10 m, en contacto nuevamente con el devónico que se caracteriza por ser areniscas sublíticas de grano fina con importantes intercalaciones de pelitas que al igual que al lado este, presentan rasgos importantes de una actividad tectónica intensa (Foto 4); dando la apariencia de un sinclinal favorecido por los corrimientos devónico.



Foto 3. Afloramiento de secuencias carbonatadas pérmicas en el Estrecho de Tiquina (ALT-76).



Foto 4. Afloramiento de secuencias devónicas intensamente deformadas (ALT-69).

Cabe resaltar que se extrajeron de esta transecta muestras para los análisis previamente indicados, con la finalidad de dilucidar nuestras dudas acerca del área de estudio.

La segunda sección presentada se ubica al norte del Lago Titicaca, en la localidad de Japis entre las Lagunas Titihue y Cupisco (Fig. 36); rescatando del trabajo en ella, la distribución característica de las unidades al noreste del área de estudio (Fig. 37), puesto que podemos apreciar la disposición de las unidades triásicas - jurásicas - cretácicas, tal y como se muestran a lo largo de la parte occidental del Altiplano Peruano.

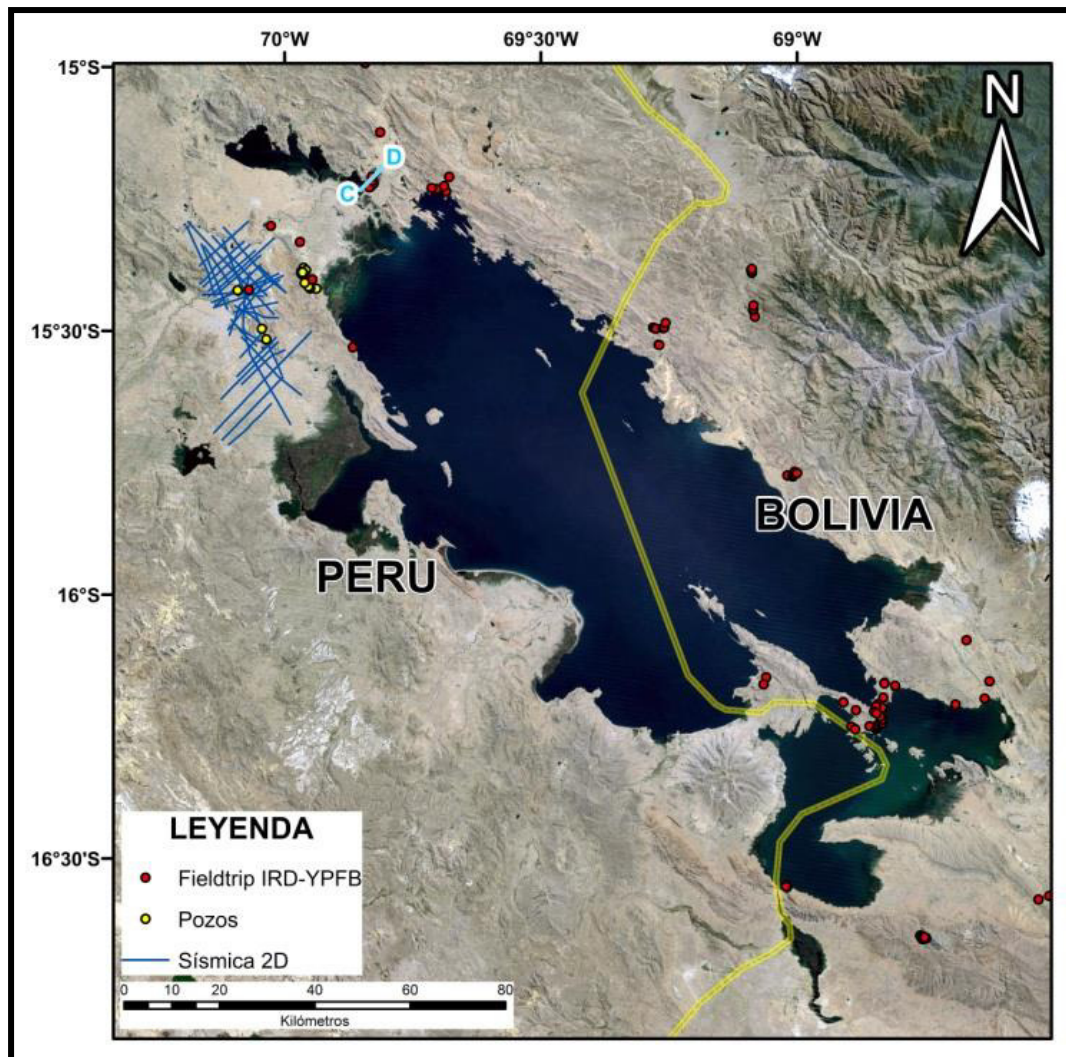


Fig. 36. Ubicación de la sección desarrollada al norte del Lago Titicaca.

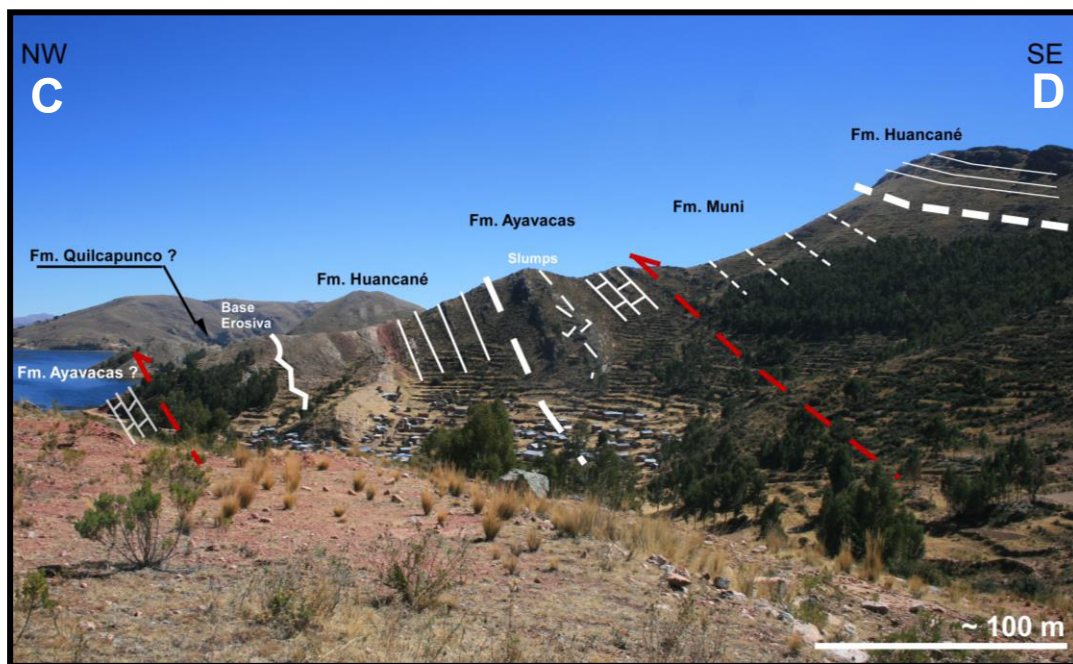


Fig. 37. Sección interpretada en la localidad de Japis.

Dicho esto, a la base de la secuencia que fue registrada en el afloramiento se encuentran niveles calcáreos micríticos (ALT-104), suprayaciendo a éste por medio de un corrimiento, la formación Quilcapunco?, caracterizada por ser un paquete de areniscas granodecrecientes cuarzosas gris clara de grano fino, intercaladas con limolitas rojizas (Foto 5) de posible edad triásica - jurásica, sobre ésta encontramos en contacto erosivo (ALT-99), a la formación Huancané (ALT-100), constituyéndose en su base por tener conglomerados parduzcos principalmente constituido de cuarzo en una matriz feldespática con granos gruesos subredondeados (Foto 6) en estratos tabulares y hacia el tope areniscas de grano medio con intercalaciones de limos, mostrando que estamos describiendo una secuencia fluvial granodecreciente; sobreyace a la secuencia niveles calcáreos con deformación sinsedimentaria, característicos de la Formación Ayabacas de edad cretácica superior, y posteriormente suprayaciéndolo mediante un corrimiento la formación jurásica Muni, pelitas rojizas a violáceas, y sobre ésta la formación Huancané mediante una discordancia erosiva angular (Foto 7).

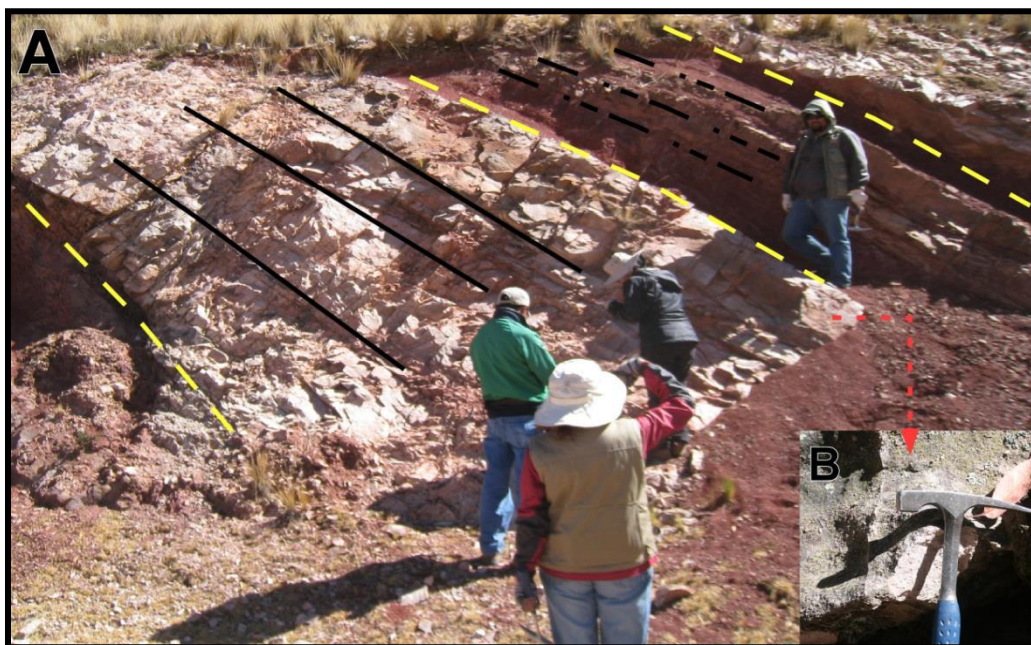


Foto 5. A. Secuencias granodecrecientes, niveles de areniscas cuarzosas intercaladas con limolíticos interpretadas como la Formación Quilcapunco. (ALT - 98) B. Vista ampliada de los niveles de areniscas cuarcíticas grisáceas claras de grano fino.

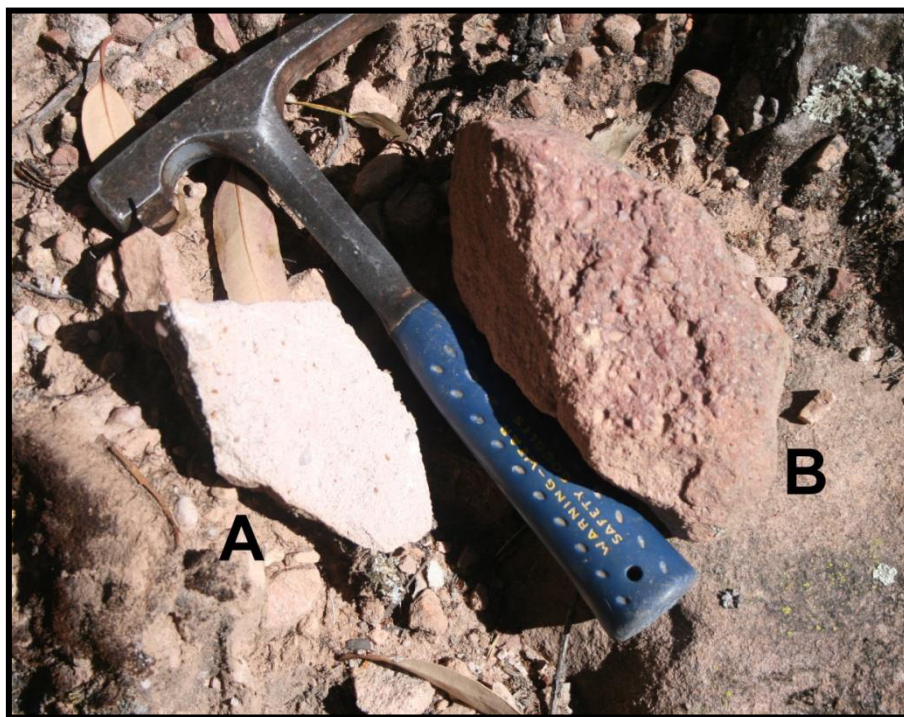


Foto 6. Contrastes litológicos en la identificación de las distintas areniscas de la Formación Quilcapunco (A) y Formación Huancané (B) (ALT - 99).



Foto 7. Discordancia erosiva angular entre las formaciones Huancané y Muni, en cercanías a la localidad de Jaspi (ALT-106).

Continuando con nuestro recorrido, observamos la secuencia jurásica - cretácica - terciaria, que aflora en el Sinclinal de Vilquechico, de donde pudimos extraer una muestra (Foto 8) en la Formación Vilquechico de edad Cretácico Superior - Paleógeno (ALT - 107) para análisis de procedencia, reflectancia de vitrinita así como precisar su edad con dataciones bioestratigráficas.

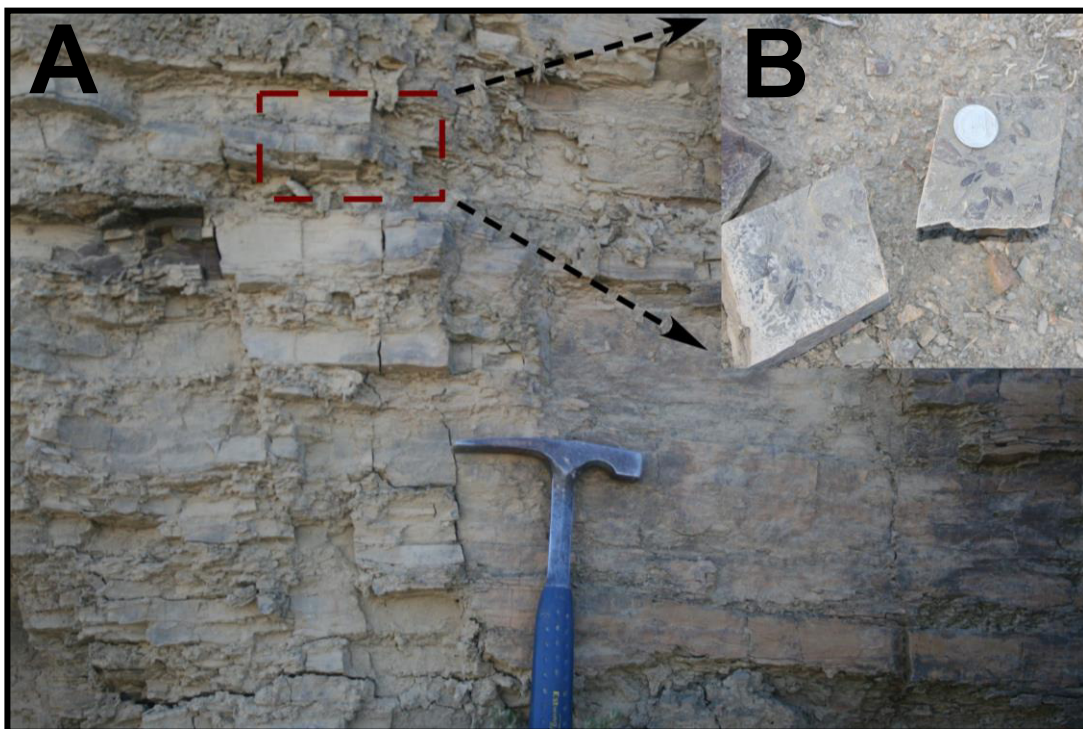


Foto 8. A. Secuencia rítmica pelítica de la formación Vilquechico. B. Ampliación de las secuencias de lutitas, mostrando los restos fósiles de plantas (ALT-107).

Es necesario indicar que no pudimos desarrollar un trabajo a detalle en las zonas propuestas en el país, puesto que no contábamos con las garantías necesarias debido a que la zona está enmarcada en un lote en estado de fuerza mayor, y en consecuencia el tema social es muy dominante, expulsados súbitamente en muchas ocasiones de excelentes afloramientos por las comunidades; sin embargo pudimos recolectar datos de las formaciones geológicas aflorantes dentro de nuestro trayecto en carretera a lo largo del área de estudio, todas éstas anexadas (Tabla 4) al presente informe.

3.3. DATOS DE SUBSUELO

La información que se maneja actualmente del subsuelo de la Cuenca del Altiplano, es muy pobre; a pesar de la existencia de aproximadamente 45 pozos perforados (Fig. 38), más del 90% de éstos, son pozos someros, o no se tiene información detallada de su perforación ni registros que puedan servir de apoyo.

A lo largo de su historia exploratoria, la cuenca Titicaca ha sido objeto de muchos trabajos con intereses hidrocarbúferos, que fueron detallados en el capítulo anterior, pero es necesario en este apartado ahondar en los estudios que manifestaron su interés por medio de la perforación de pozos petroleros.

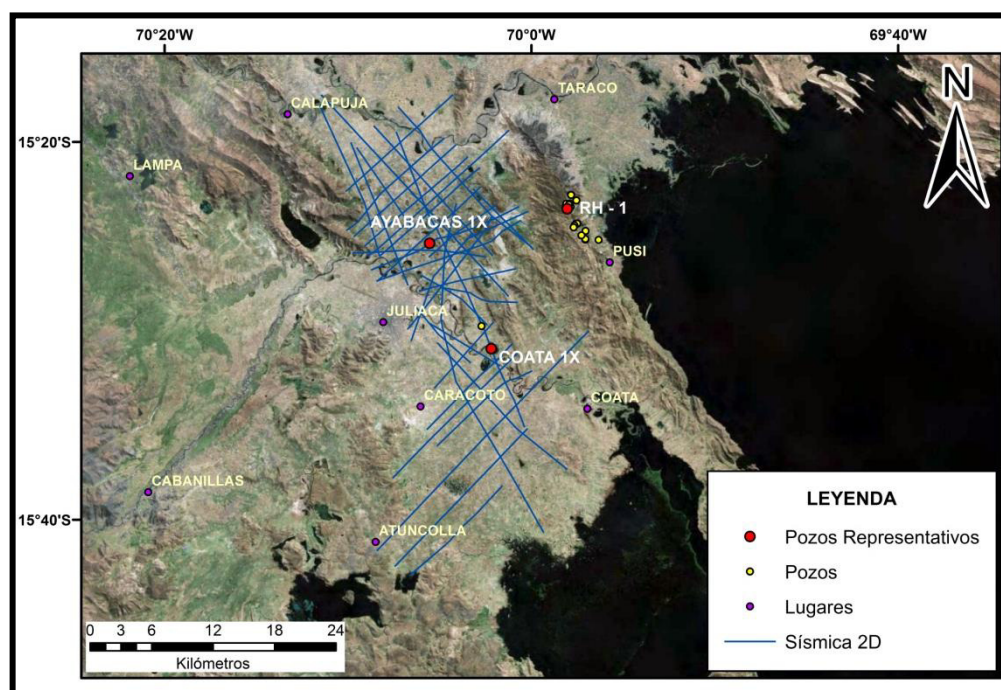


Fig. 38. Pozos perforados en la Cuenca Titicaca.

Es de conocimiento público que dentro de la Cuenca del Altiplano, específicamente en el área de Pirin, se halla el campo petrolífero más alto del mundo con una producción acumulada de aproximadamente 300 000 barriles de petróleo de una excelente calidad (37° API - 40°API), siendo COROCORO COMPANY, la primera empresa en perforar utilizando *cable rig* (TD máximo de ~ 180 m) descubriendo hidrocarburos por debajo de los 122 m. Esto dio inicio a la posterior perforación de 10 pozos más a cargo de Titicaca Oil Company, que antes de 1911 logró por medio de 07 pozos la producción de alrededor de casi el 95% (281 250 barriles) del petróleo obtenido a la fecha.

Posteriormente diversas compañías petroleras, con el aval de la producción precedida realizaron trabajos de perforación pero sin resultados alentadores; sin embargo el gobierno peruano a través del "Cuerpo de Ingenieros de Minas" operó el campo entre 1938 y 1946 perforando 11 pozos (RH - 1/10-12), 03 pozos en Pirin y otros 07 de 2 a 5 km al sureste del campo, con TD's entre 57 a 626 m. De este último trabajo, se puede extraer información relevante que ayudará posteriormente a mostrar la conjetura del proyecto.

Ya en los 90's, en base a la previa adquisición de 551.8 de sísmica 2D, la compañía Yugansk Petro Andes S.A, perfora 03 *wildcats* tanto en el lote S-2 (Coata 1X - Coata 2X) y S-4 (Ayabacas 1X), lamentando no llegar a poder iniciar producción debido a que no era una cantidad comercial, sin embargo destacando la presencia de indicios de hidrocarburos en el pozo Coata 1X.

Con posterioridad a las compañías antes mencionadas, no se tiene registro de nuevos trabajos de perforación en la Cuenca Altiplánica, más aún se tiene información de distintos trabajos geológicos que fueron mencionados con anterioridad.

A continuación, tocaré la descripción y análisis de las unidades sedimentarias que atraviesan 03 pozos representativos del área de trabajo (Fig. 38), para poder adjuntarlo con nuestro modelo de superficie y posteriormente proponer un modelo de una nueva columna litoestratigráfica.

3.3.1. Pozo Ayabacas 1X

El pozo Ayabacas 1X (8294390 - 382712), es uno de los "modernos" pozos perforados en 1997 por la compañía petrolera Yugansk Petro Andes S.A., ubicándose al noroeste del antiguo lote S-4 a 25 km al oeste del antiguo campo Pirin. El objetivo del pozo era ubicar una estructura interpretada por la compañía de 8.5 km x 3.5 km con un cierre de 800 m o 300 ms, alojado en el tren estructural Ayabacas que tiene una dirección preferencial NW - SE; sin embargo la prognosis difiere totalmente con la columna estratigráfica perforada. Es necesario indicar que este pozo, no encontró indicios de hidrocarburo; sin embargo se realizaron 02 *DST's* aunque sin resultados significativos. Por lo expuesto considero que era necesario hacer una reinterpretación de la columna perforada (Fig. 39), en base a las nuevas evidencias que se tienen a la fecha para explicar de una manera más convincente la estratigrafía del área.

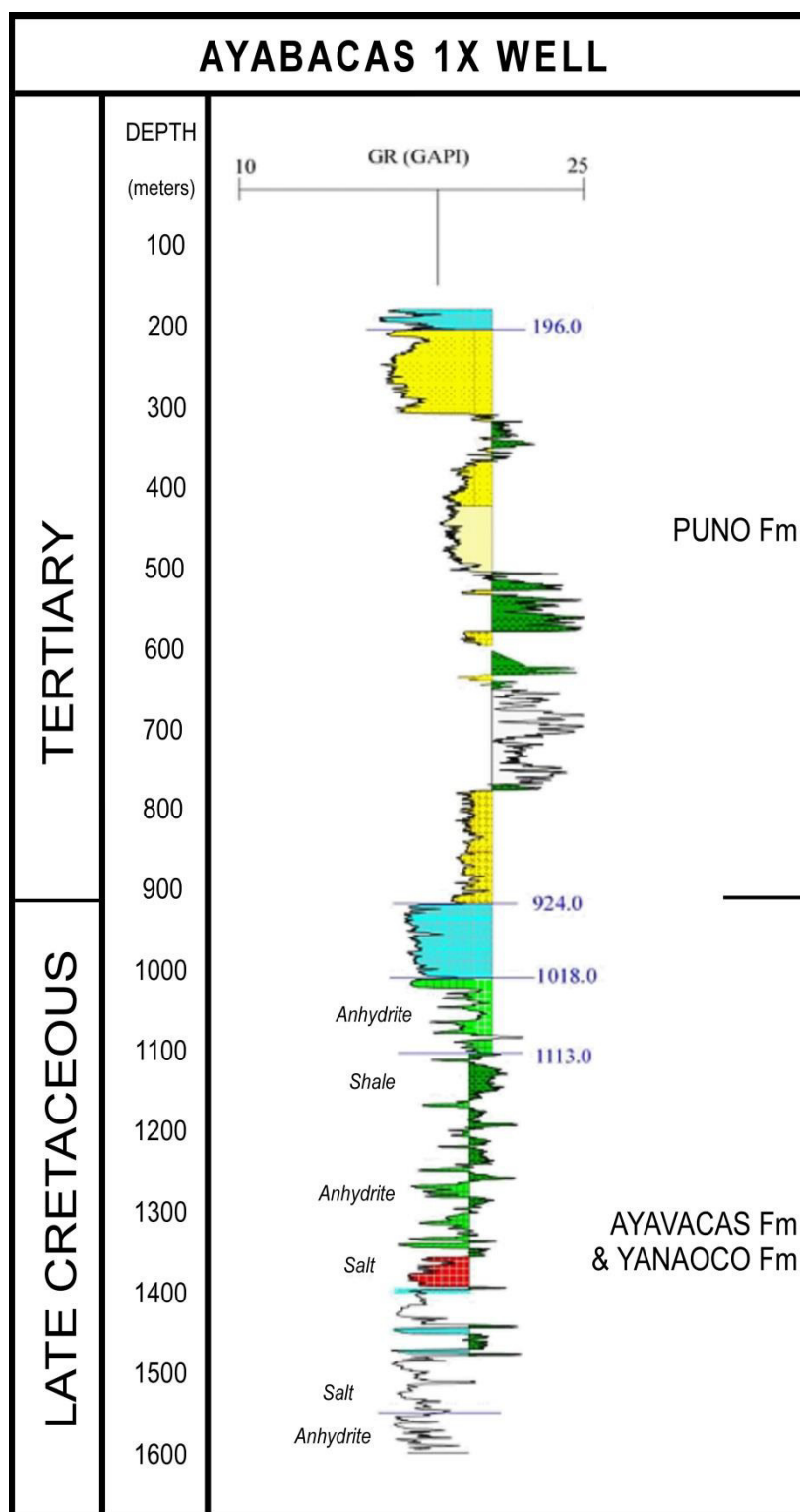


Fig. 39. Columna estratigráfica del pozo Ayabacas 1X (Modificado de PERUPETRO S.A., 2008)

Como se muestra; el pozo Ayabacas 1X empieza su perforación en una secuencia predominantemente continental, con intercalaciones de areniscas de grano medio a grueso, limos y a su vez niveles pelíticos (~ 900 m) que son claramente correlacionables con las unidades terciarias aflorantes en la zona de estudio; posteriormente atraviesa una secuencia calcárea deformadas en la base y el tope, que incluye niveles evaporíticos, y también delgados bancos de lutitas (~ 700 m); evidencia que nos permite dilucidar que esta unidad puede ser atribuido a la Formación Ayabacas, de forma análoga como se presenta en afloramiento en el Área de Pirin.

3.3.2. Pozo Coata 1X

El pozo Coata 1X (8284147 - 388728.789), también perforado por la compañía YUGANSK PETRO ANDES S.A., se ubica a 16 km al oeste del antiguo campo Pirin, también dentro del antiguo lote S-2. Fue diseñado para probar la estructura "*Coata Sur*", dicho anticlinal asimétrico fue definido por geología de superficie, magnetometría y confirmado por la interpretación sísmica de la compañía. Los objetivos principales fueron las areniscas "cretácicas" (bajo la perspectiva de la compañía del momento) de la Formación Huancané, así como las areniscas turbidíticas del Grupo Cabanillas, a su vez sus objetivos secundarios fueron las areniscas cretácicas del entonces definido Grupo Moho, así como las dolomitas pérmicas del Grupo Copacabana. Cabe resaltar que a partir de la comparación de la prognosis con la columna perforada, existen sustanciales diferencias; tal es así que tuvieron que variar su profundidad total programada de 2000 m a bordear los 2900 m. Relevantes datos pueden ser rescatables de los 09 DST's realizados, pero considero que la presencia de *shows* de hidrocarburos en capas de calizas con presencia de brechas sinsedimentarias calcáreas es lo más interesante y ayuda a generarnos una nueva interpretación más prolija del mencionado pozo (Fig. 40).

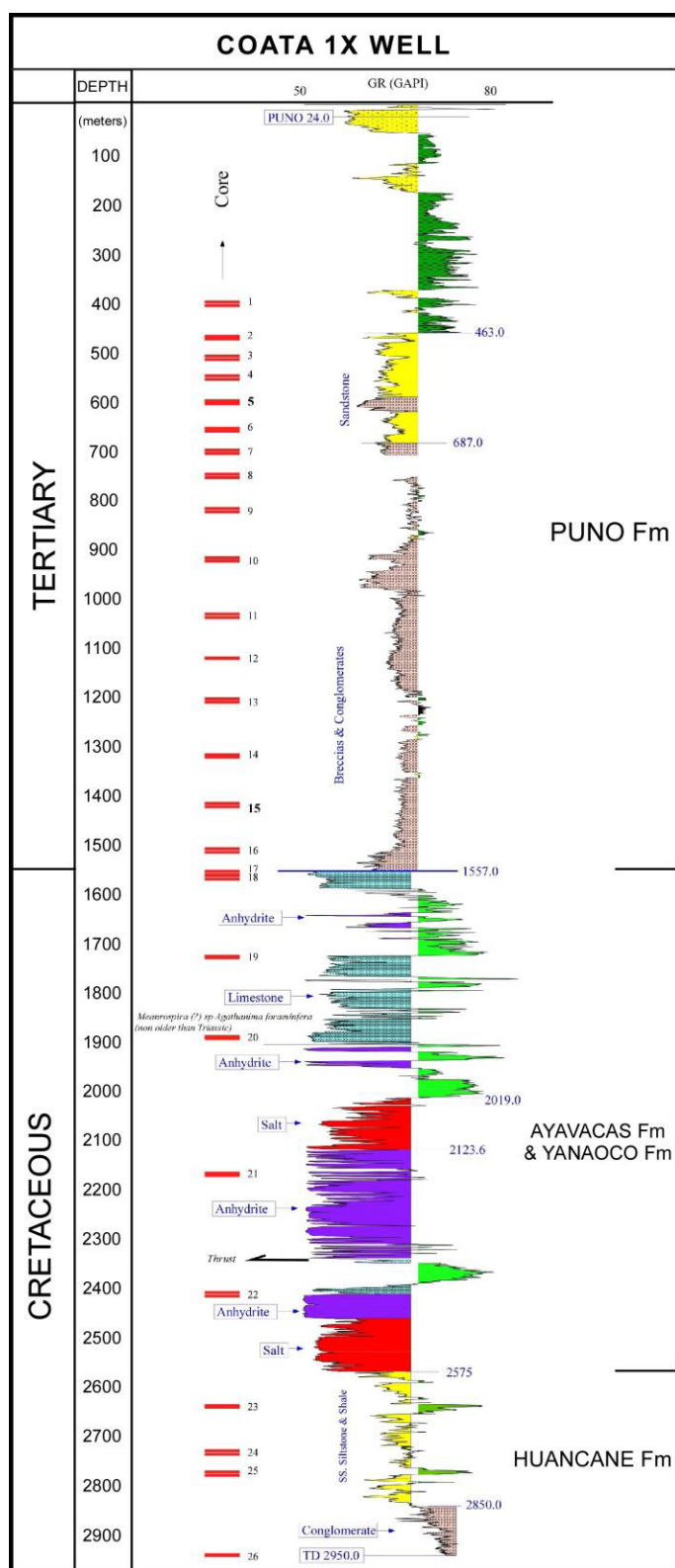


Fig. 40. Columna estratigráfica del pozo Coata 1X (Modificado de PERUPETRO S.A., 2008)

En la columna mostrada, observamos que el pozo Coata 1X de forma similar que el pozo Ayabacas 1X atraviesa una secuencia continental conformada principalmente por areniscas de grano medio, lutitas y hacia la base niveles de brechas y conglomerados correlacionables con las capas terciarias de la Formación Puno; seguidamente el pozo perfora toda una secuencia de calizas deformadas (Foto 9) intercaladas con bancos de pelitas, así como niveles de anhidrita - sal (~900 m), que basados en nuestras interpretaciones podemos atribuir toda esta secuencia a la Formación Ayabacas que ha sufrido un "engrosamiento" en función a la inyección de estos niveles evaporíticos tal y como puede estar sucediendo en el pozo anterior; posteriormente el pozo atraviesa niveles de areniscas, limolitas y pequeños bancos de lutitas, finalmente concluyendo en niveles de conglomerados, que basados en nuestro relevamiento geológico así como en las descripciones de autores que me precedieron (Acosta, 2001) y al no tener dataciones, nos apoyamos en el principio de superposición estratigráfica (Steno, 1669) y le asignamos a toda esta unidad como la Formación Huancané.



Foto 9. Core extraído del pozo Coata 1X, entre los 1731 m - 1734 m. Descrita como caliza gris verdosa mudstone - brechosa con clastos de calizas negras.

3.3.3. Pozo RH - 1

El pozo RH -1 (8297524 - 396792) realizado en 1938, ubicado exactamente en el antiguo campo Pirin, fue uno de los 11 pozos realizados por el "Colegio de Ingeniero de Minas", con características dadas como un TD de 593.15 m atravesando para la interpretación del momento, "unidades terciarias", "cretácicas" y finalizando en el Grupo Cabanillas; cabe indicar como información adicional que este pozo resultó seco. Por otra parte, las razones que detallan su abandono responden a que fue perforado en la Estructura Pirin, pero que estaba inundada de agua.

Antes de explicar la litología del pozo, es necesario previamente entender la ubicación geológica del mismo; en concreto para todas las interpretaciones precedentes, la unidad donde está posicionado el pozo recae sobre "capas terciarias" y obviamente bajo esta premisa la primera unidad a perforar son las mismas secuencias. Lo singular de estas interpretaciones, es que estas "*unidades terciarias*" infrayacen a unas "*calizas intensamente deformadas*", analizado esto, en afloramiento y observable claramente en las imágenes satelitales (Fig. 41, Fig. 42); dicha esta cuestión, consideramos que se ha generado una confusión en la asignación de estas unidades, puesto que estas calizas muy deformadas, no son otras que la tan estudiada por distintos autores, Formación Ayabacas; en consecuencia por el principio de superposición estratigráfica (Steno, 1669), las unidades que infrayacen a la secuencia calcárea, no serían otras que la Formación Huancané, caracterizada por presentar en uno de sus miembros niveles conglomerádicos o brechosos (Acosta, 2001), y que previamente ha sido observado en el Pozo Coata 1X de forma análoga.

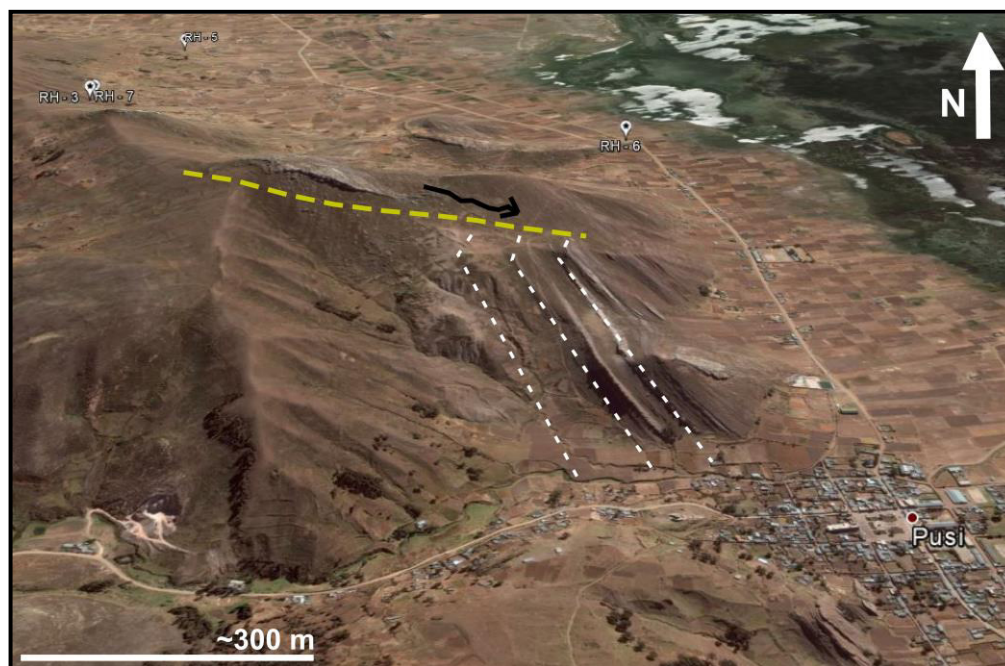


Fig. 41. Imagen Landsat mostrando la disposición de las Formaciones Ayabacas y Huancané

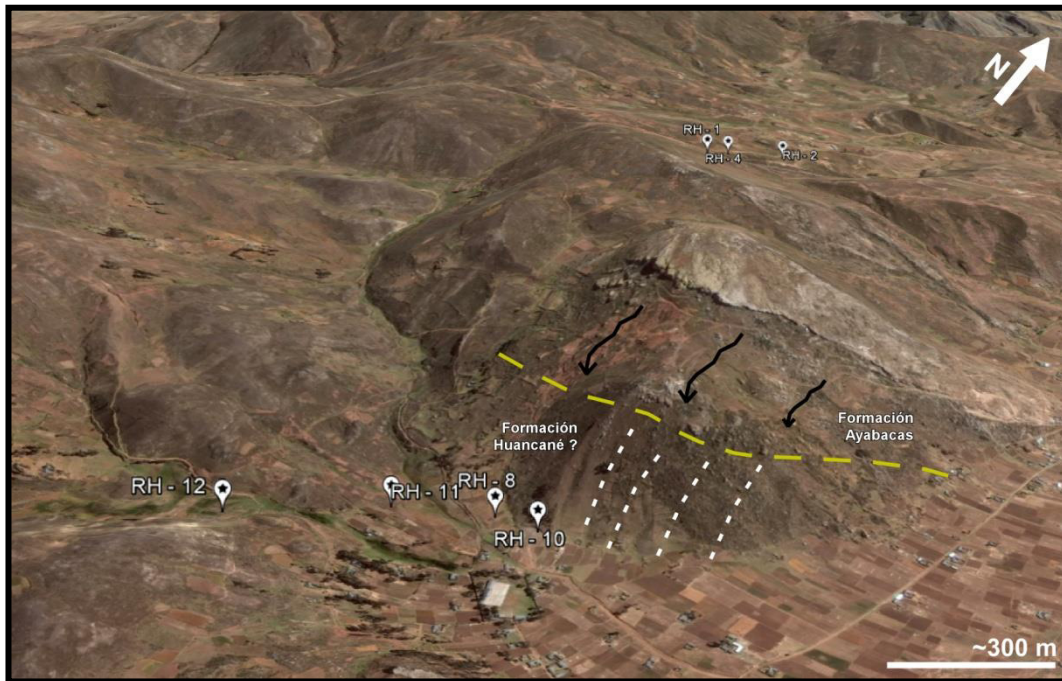


Fig. 42. Imagen Landsat mostrando la disposición de las Formaciones Ayabacas y Huancané aflorantes en el campo Pirin.

Dicho esto, a continuación muestro la nueva interpretación (Fig. 43) que se ha realizado de las secuencias que perfora el pozo.

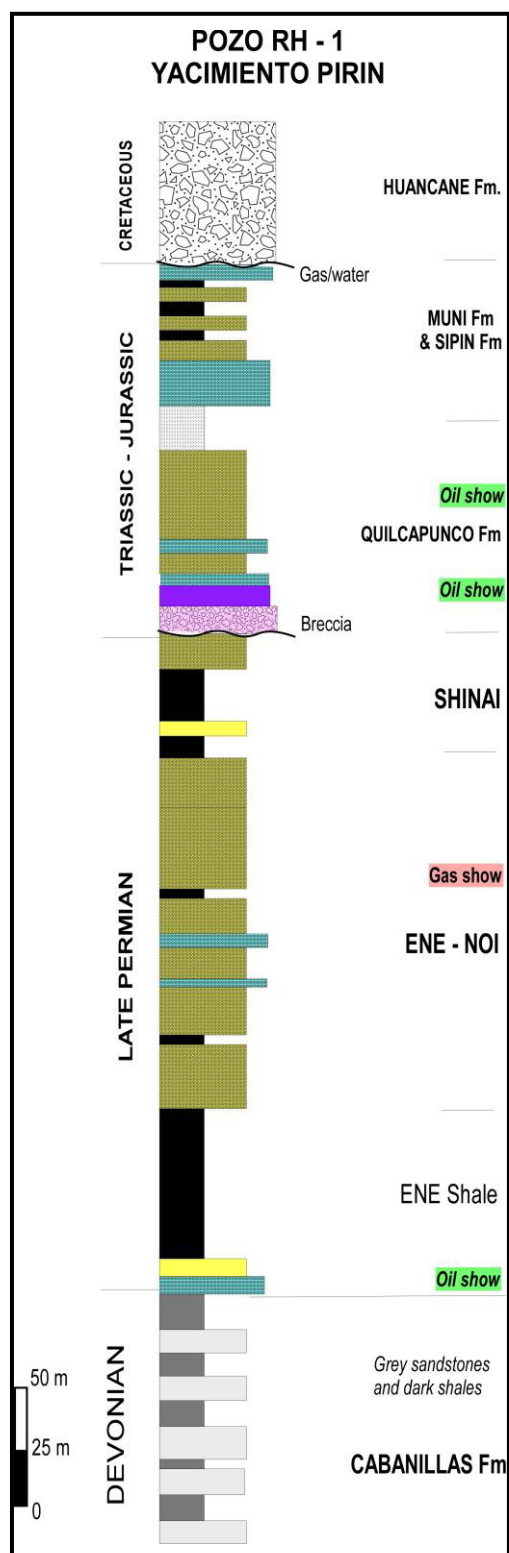


Fig. 43. Columna estratigráfica del pozo RH - 1 (Modificado de PERUPETRO S.A., 2008)

Como observamos, la primera unidad que atraviesa el pozo, es la Formación Huancané, caracterizada en base al registro litológico como una secuencia de "*brechas redondeadas*" de cuarcitas verdes grisáceas en una matriz rojiza (~ 60m), concordante con nuestras interpretaciones previamente mencionadas; posteriormente ingresa a una unidad con clara influencia marina predominantemente pelítica, y calcárea en su base, comparados con las unidades jurásicas Muni y Sipin (~ 75m); luego toca un paquete de areniscas de grano medio, delgados niveles de calizas y anhidritas y la base una secuencia de brechas, posiblemente correlacionable con la Formación Quilcapunco (~95 m), descrita previamente por Acosta (2001) de edad Triásico - Jurásico? , que resulta muy relevante, debido a que es aquí donde se observa indicios de petróleo; posteriormente ingresa a una secuencia predominante pelítica, con delgadas intercalaciones de niveles de areniscas de grano fino; luego atraviesa una secuencia de areniscas grises (de donde se obtuvo indicios de gas) con delgadas intercalaciones de lutitas y calizas y hacia su base secuencias finas de lutitas con un pequeño nivel calcáreo a su base; este paquete (~ 280 m) que acaba de ser descrito, por encontrarse debajo de una unidad triásica? y complementado por las descripciones análogas en Ucayali Sur, así como en Madre de Dios, podemos estar hablando del Grupo Ene asignado en una edad, Pérmico Superior; y culminando con la perforación del pozo, finalmente atraviesa una unidad de areniscas grises y lutitas oscuras, correlacionables previamente también con el Grupo Cabanillas.

En base a lo descrito previamente, estamos insertando las unidades pérmicas superiores, previamente ya habían sido también incluidas por Hermoza (PERUPETRO S.A., 2008), en nuestra interpretación estratigráfica basada en los argumentos lógicos y sustentado en las evidencias de campo y subsuelo, apoyado también que no existe dataciones contundentes que ameriten la estratigrafía de los distintos autores que me preceden.

Cabe indicar que los resultados de la evaluación de los pozos representativos son producto de un exhaustivo análisis petrofísico aprovechando al máximo la información existente, así como discutido también con diferentes informes de descripción litológica de los responsables de los estudios previos; todo esto vinculado además con nuestro análisis estructural para generarle una mayor validez a nuestra propuesta, que será mostrada en el capítulo posterior.

3.4. NUEVO MODELO ESTRATIGRÁFICO

3.4.1. Columna Estratigráfica Generalizada

En base a la información presentada, y con el objetivo de menoscabar la incertidumbre estratigráfica que acarrea el área de estudio, se propone una columna generalizada (Fig. 44), la cual trata de sintetizar tanto la información de superficie como la de subsuelo y confluir en una nueva propuesta estratigráfica para la Cuenca Titicaca.

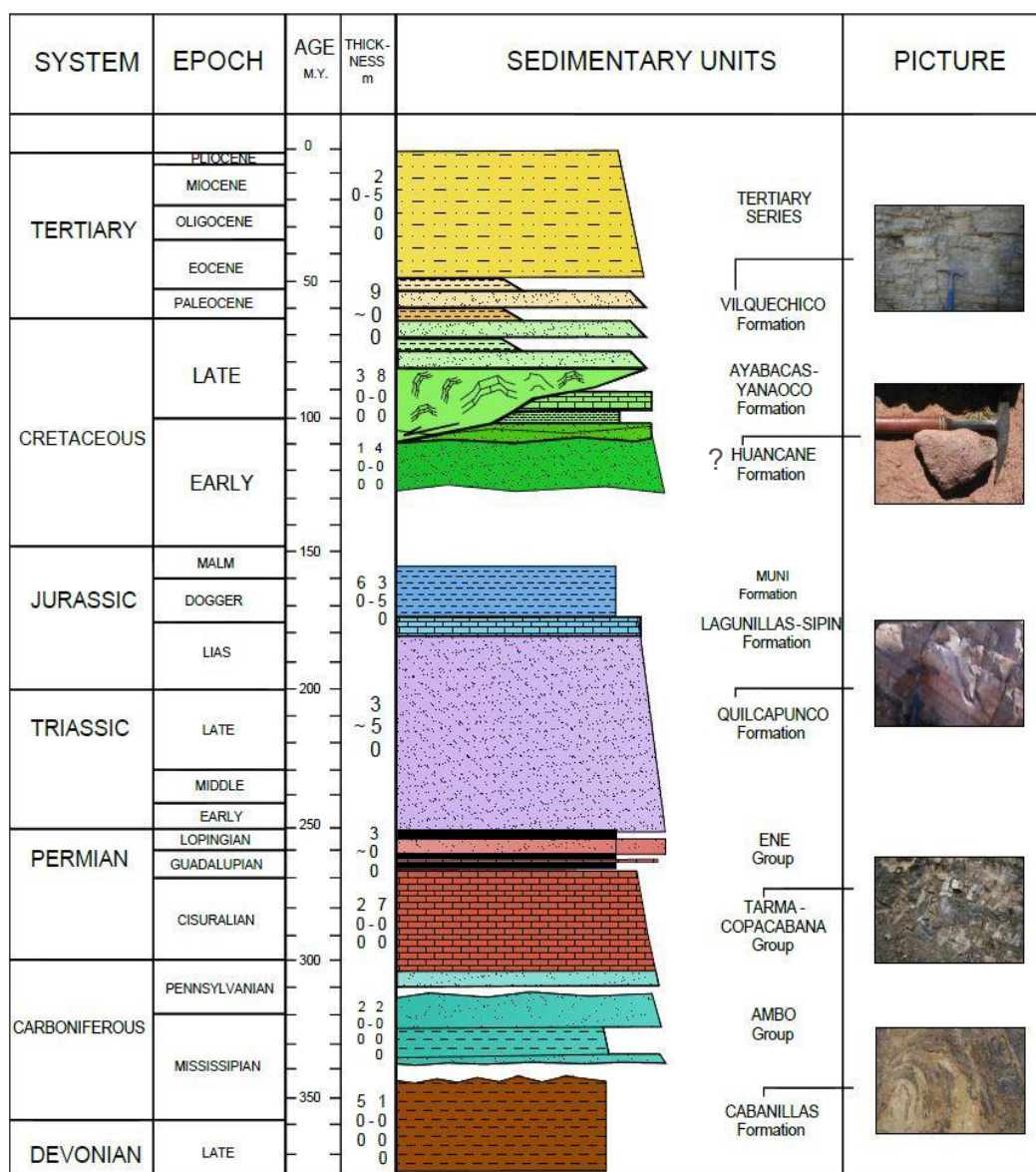
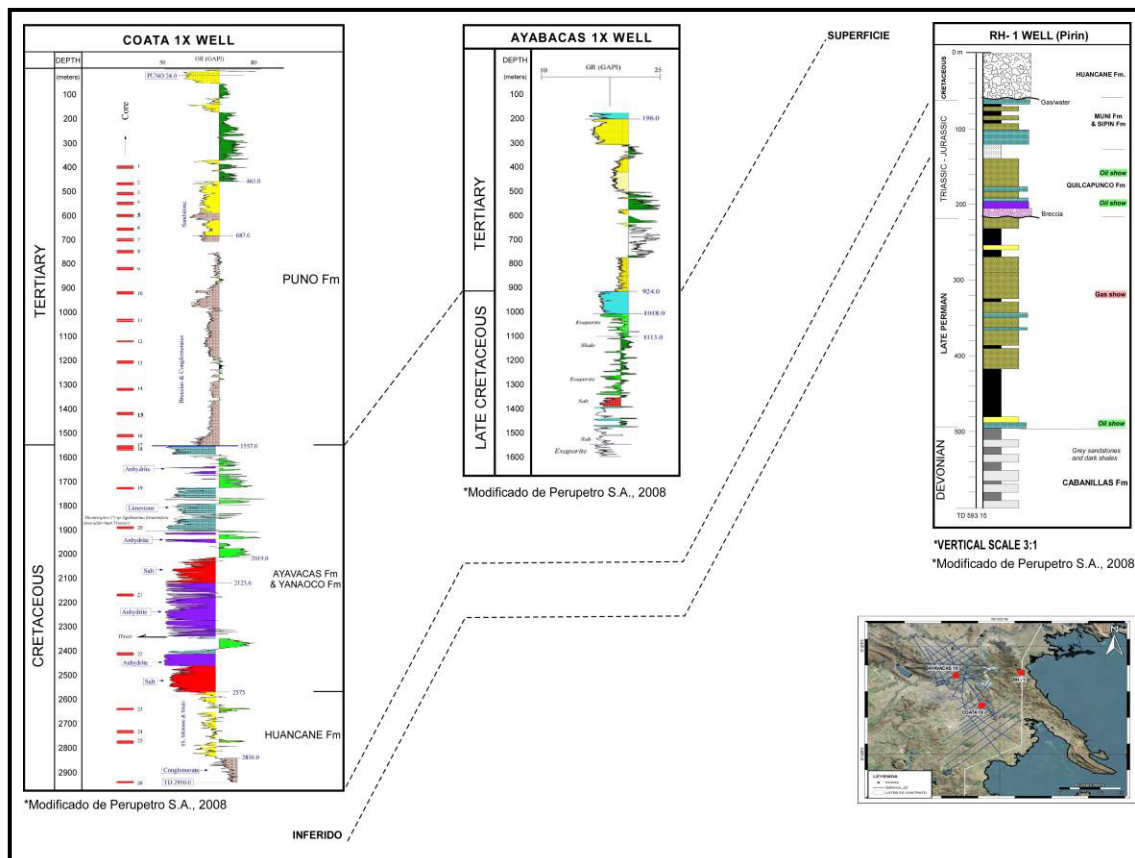


Fig. 44. Columna estratigráfica generalizada propuesta para el área de estudio.

3.4.2. Correlaciones Estratigráficas Pozos - Afloramientos

3.4.2.1. Correlación de los pozos representativos

Como se muestra a continuación, presentamos una correlación estratigráfica basada en nuestra nueva interpretación de los pozos Coata 1X, Ayabacas 1X así como el de RH-1 del Yacimiento Pirin (Fig. 45). Nótese que las unidades cretácicas atravesadas por los pozos Coata 1X y Ayabacas 1X, se distribuyen lateralmente presentándose en afloramiento hacia la zona de Pirin. En el caso de las secuencias cretácicas inferiores de la Fm. Huancané, identificada también en el pozo Coata 1X, son distribuidas de manera análoga, infiriendo su presencia en la prolongación del pozo Ayabacas 1X, en base al reconocimiento de dicha unidad tanto en afloramiento como en la interpretación del registro litológico del pozo RH-1.



3.4.2.2. Correlación de las Secuencias Pérmicas Superiores - Triásicas

En adelante se muestra la correlación estratigráfica enfatizando en el reconocimiento e interpretación de las unidades pérmico superiores y triásicas (Fig. 46), tanto en el Altiplano como en las cuencas de Ucayali y Madre de Dios, corroborando así la extensión de estas unidades importantes en el sistema petrolero, debido a su ya probada producción de hidrocarburos en las cuencas subandinas.

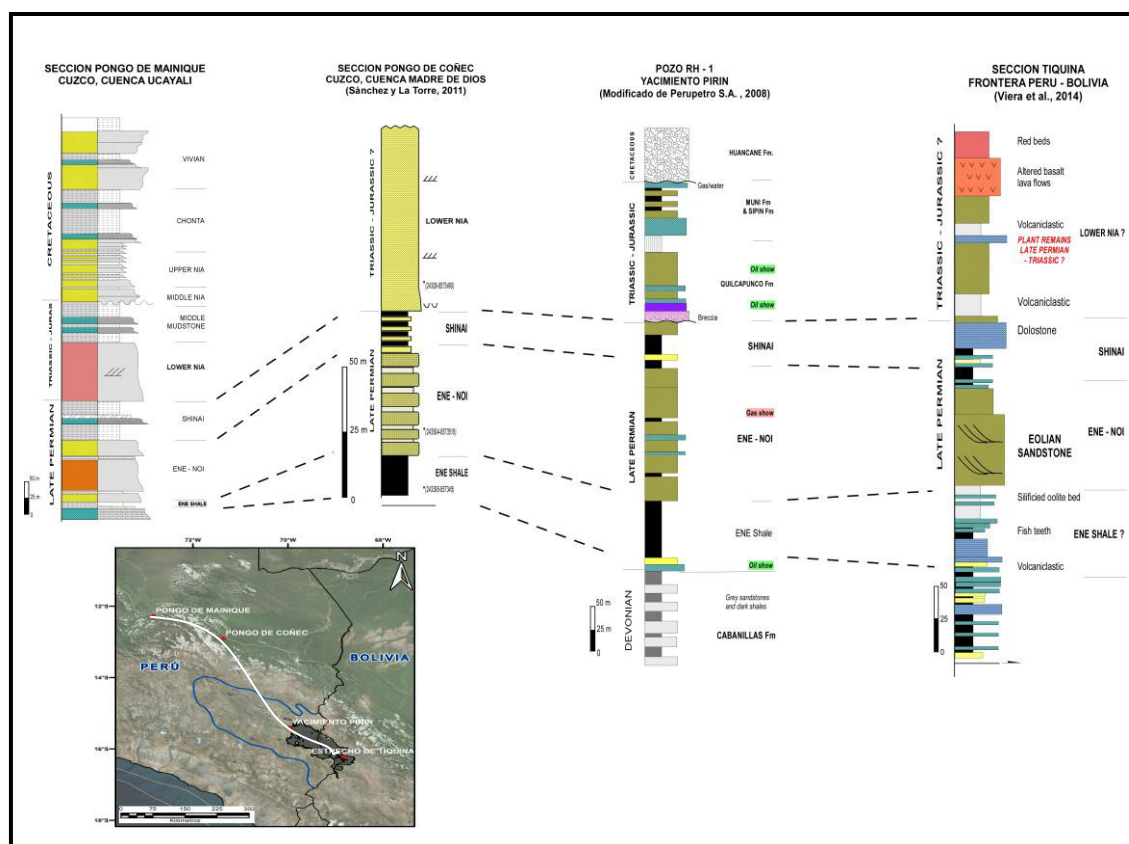


Fig. 46. Correlación estratigráfica de las unidades pérmico superiores - triásicas entre el Pongo de Mainique, Pongo de Coñec, Pozo RH - 1 y el Estrecho de Tiquina.

Para un mejor entendimiento muestro un *flattening* (Fig. 47) de las unidades previamente mencionadas, tomando como nivel de referencia la base de la unidad Lower Nia o Quilcapunco (para el Altiplano), para clarificar la distribución estratigráfica.

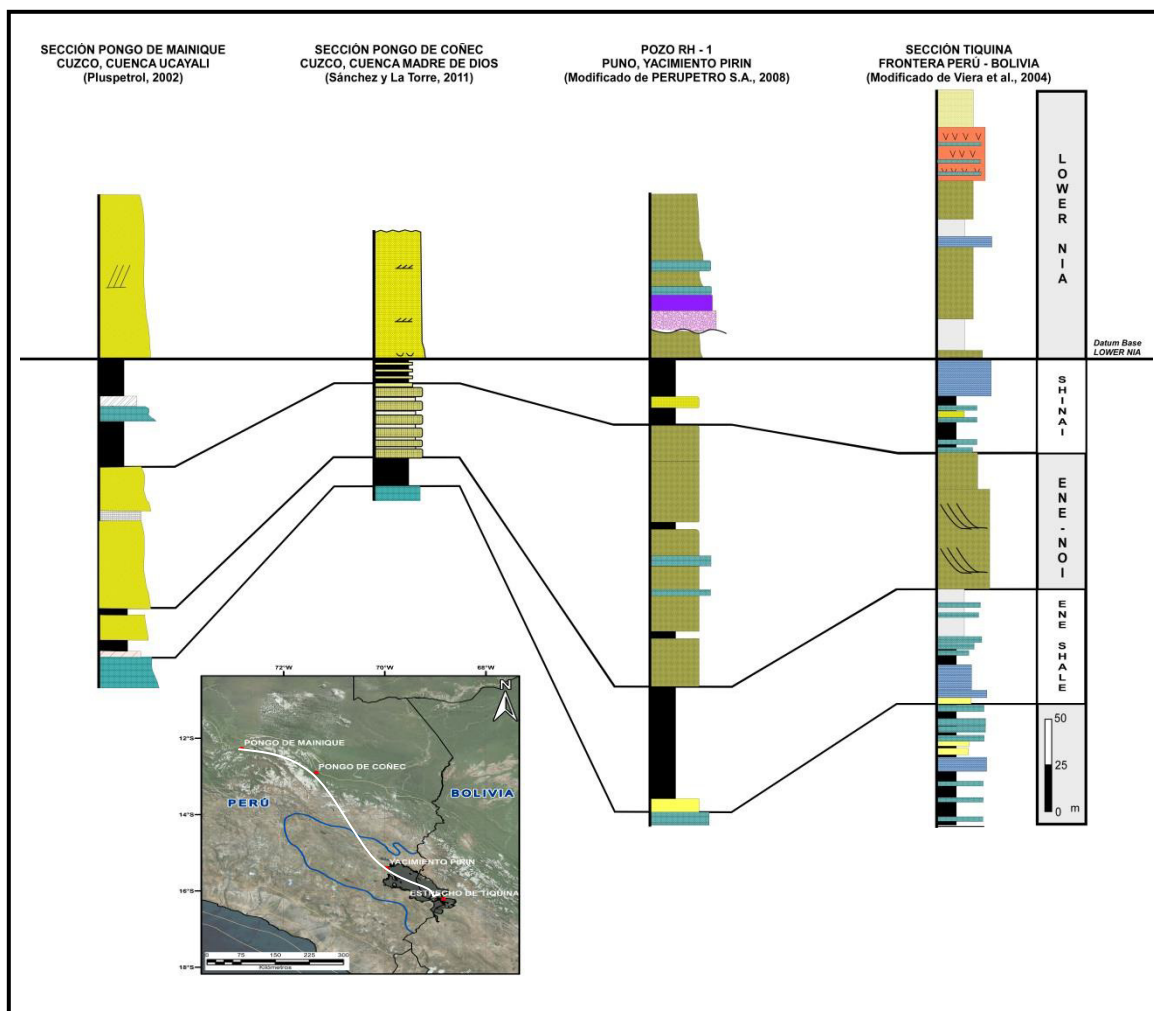


Fig. 47. Flattening a la base de Lower Nia (Quilcapunco, para el Altiplano) para enfatizar en las unidades pérmico superiores, distribuidas entre el Pongo de Mainique, Pongo de Coñec, Pozo RH - 1 y el Estrecho de Tiquina.

3.5. NUEVO DIAGRAMA LITOESTRATIGRÁFICO PROPUESTO

A partir de la integración de la información geológica precedida, y con la finalidad de generar un modelo que pueda conllevar a un claro entendimiento de la distribución lito-estratigráfica mostramos el diagrama siguiente (Fig. 48) el cual muestra las principales características de las secuencias sedimentarias del área así como su respectiva extensión.

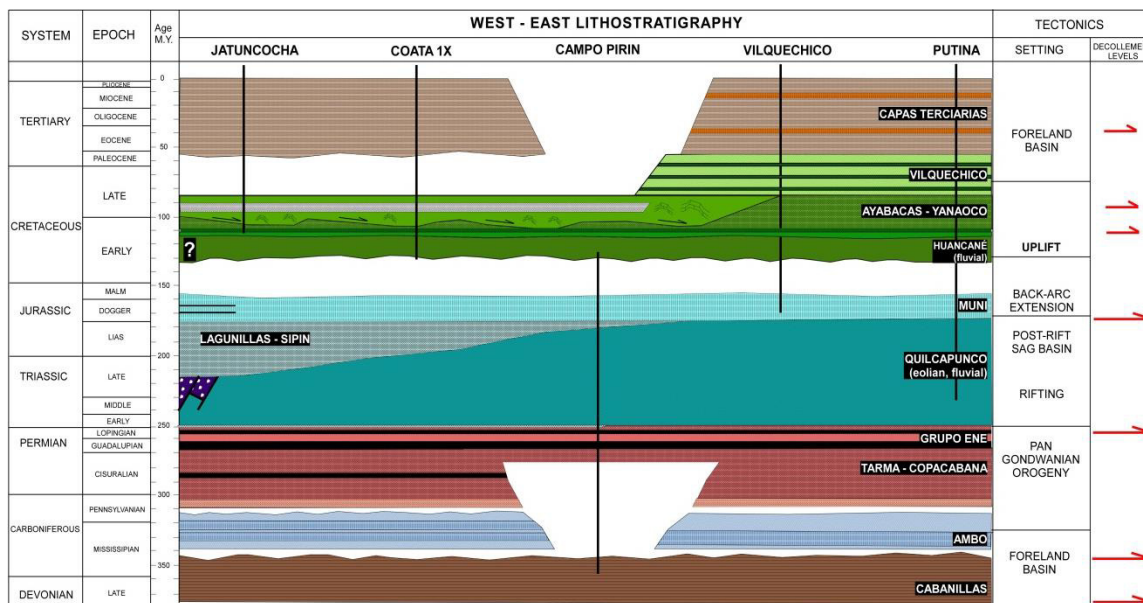


Fig. 48. Diagrama lito-estratigráfico mostrando la distribución de las secuencias sedimentarias a lo largo del área de estudio.

Las secuencias silúricas - devónicas vienen siendo representadas por la Formación Cabanillas, la cual aflora en el área de Pirin, Laguna Jallapisi, Cabanillas y la zona de transición de la Faja Plegada del Altiplano y la Cordillera Oriental (PERUPETRO S.A., 2008). Principalmente caracterizadas por ser una sucesión gruesa de areniscas y lutitas negras fosilíferas, conteniendo braquiópodos, conularias y trilobites. Las secuencias de la Formación Cabanillas se depositaron en un contexto de cuenca de Antepaís en ambiente marino somero. Estructuralmente, las secuencias de la Formación Cabanillas constituyen un importante nivel de despeque en la cuenca Titicaca. (PERUPETRO S.A., 2008)

Si abordamos el periodo Carbonífero Inferior, mencionaremos que en su parte basal, en la zona de estudio se encuentra el Grupo Ambo, constituido mayormente por areniscas feldespáticas de colores claros hacia la base y areniscas gris verdosas intercalada con lutitas y limolitas hacia el tope (Ordoñez, 1995). Dichas secuencias corresponden a depósitos de progradación de llanura deltaica a marino somero siliciclástico, desarrolladas en la cuenca de antepaís carbonífera (PERUPETRO S.A., 2008).

En los periodos Carbonífero Superior - Pérmico Inferior, ubicamos al Grupo Tarma - Copacabana, pudiendo ser diferenciado en la frontera Peruana Boliviana (Estrecho de Tiquina), puesto que en su parte basal (Formaciones Cumaná - Kasa) se caracteriza por tener areniscas sublíticas blanquecinas, rojizas y parduzcas presentando intercalaciones de diamictitas verdosas, que retrogradan a una plataforma carbonatada extendida en mayor dimensión (Formación Copacabana) en la zona de estudio.

Al abordar el Pérmico Superior es necesario indicar que estamos tratando de una secuencia significativa para el entendimiento del área de estudio, denominada en el presente trabajo como en sus símiles de Camisea y Madre de Dios, Grupo Ene, puesto que se presenta en subsuelo en el área prospectiva de Pirin (Pozo RH-1); así como en afloramiento a lo largo del mismo *trend* estructural en la frontera Peruana Boliviana representado por la formación Chutani, secuencias marinas y siliciclásticas, previamente explicada en los apartados anteriores. Considerable como un nivel de despegue regional a lo largo del sur del Perú (PERUPETRO S.A., 2008).

La secuencia Tríasico - Jurásico Inferior, es representada por la formación Quilcapunco, insertada previamente por Acosta (2001), consideramos que esta unidad es correlacionable con la formación *Lower Nia* desarrollada ampliamente en la zona subandina peruana, con las mismas características sedimentológicas asociándolas a un ambiente predominantemente continental. Cabe indicar que este período está dominado también, por la apertura del Rift Tríasico (Grupo Mitu), siendo éste, el equivalente lateral de la formación previamente mencionada. En la zona de estudio se presentan como areniscas cuarzosas fluviales, con presencia de canales, así como también niveles de areniscas eólicas aflorantes en su localidad tipo, Quilcapunco; constituyéndose en una potencial roca reservorio. En los registros de subsuelo, se encuentra identificada en el Área de Pirin, con gran interés debido la presencia de *oil show* en sus niveles de areniscas fluvio - eólicas superiores e intermedias con un espesor de 40 m y 15 m respectivamente.

Los niveles ubicados entre el Jurásico Medio - Jurásico Superior están interpretadas por las formaciones Sipin, y Muni, asociadas éstas a las partes proximales o bordes de la cuenca back-arc del Jurásico. (PERUPETRO S.A., 2008).

La formación Sipín, en el área de estudio, se caracteriza por presentar principalmente calizas grises masivas con calizas y lutitas oscuras fosilíferas (potencial roca madre?), éstas con intercalaciones de niveles de areniscas laminadas con estructuras de canales y limolitas rojas alterándose a limolitas amarillentas, indicando sendos cambios de nivel del mar asociados con niveles regresivos y transgresivos de la unidad. Es necesario mencionar que esta unidad puede ser un equivalente nororiental de la espesa unidad transgresiva (~ 500m) de calizas jurásicas del Grupo Lagunillas (Acosta, 2001). Dicha formación se encuentra datada por la presencia de equínidos que pertenecen al género *Diademopsis* sp., indicando el intervalo *Rhateniano-Bajociano* inferior; situándolo principalmente en el Jurásico Inferior.

La formación Muni, caracterizada por presentar lutitas y limolitas rojizas principalmente; aunque es importante indicar que también se registraron hacia el suroeste intercalaciones de calizas marinas (Newell, 1949), corroborados con nuestra interpretación litológica del Pozo RH - 1, en el área de Pirin; aflora ampliamente en la Cuenca Titicaca, siendo una importante unidad para el entendimiento tectónico del sector, debido a que ésta constituye el nivel de despegue principal para el área nororiental del presente trabajo; a su vez, muestra un paso discordante hacia las areniscas continentales de la Formación Huancané, en base a nuestras apreciaciones en campo.

Las secuencias representativas consideradas para este trabajo en el Cretácico son las unidades estratigráficas de la formación Huancané, el Grupo Yanaoco, Formación Ayabacas y parte de la Formación Vilquechico. La formación Huancané, se presenta a lo largo de toda la zona estudiada tanto en subsuelo (Pozos Coata 1X, Ayabacas 1X y Pozo RH-1), como en afloramiento en las zonas de Pirin, Yanaoco, Huancané, Vilquechico, entre otros. Son predominantemente depósitos continentales, constituyéndose de niveles conglomerádicos, fluviales y también se reportan niveles eólicos desarrollados a lo largo del Altiplano Peruano, y Boliviano. Es necesario mencionar que al tope de esta unidad se presenta una sucesión estratocreciente de areniscas cuarzosas de ambiente netamente eólico (Acosta, 2001) que podría constituir la como una potencial roca reservorio (Foto 10).



Foto 10. Imagen mostrando las secuencias de areniscas eólicas de la Fm. Huancané (PERUPETRO S.A., 2008)

Hacia la base del Grupo Yanaoco, se muestra un contacto erosivo sobre la Formación Huancané, litológicamente constituido por areniscas cuarzosas con canales conglomerádicos (Foto 11) cuyos clastos son mayormente de naturaleza cuarzosa de diámetros que varían desde 0.5 cm hasta los 20 cm), progradando hacia niveles pelíticos y limolíticos rojizos con escasas intercalaciones de canales arenosos (Acosta, 2001). Hacia el tope de la secuencia, ocurre una transgresión marina depositando niveles predominantemente lutíticos y a su vez bancos de calizas grises, mostrando que nos encontramos inmersos en una plataforma carbonatada muy somera. La sedimentación calcárea se interrumpe debido a la presencia de megabrechas u olistostromos retrabajando las formaciones Yanaoco, Huancané, Muni, Sipín, Quilcapunco y unidades del Paleozoico, dando inicio a la denominada Formación Ayabacas. Dicha unidad se encuentra distribuida en toda el área de estudio, con un espesor variable litológicamente constituido principalmente por secuencias de calizas deformadas sintectónicamente, así como niveles pelíticos y evaporíticos observados tanto en afloramiento como en subsuelo. Cabe indicar que existen dataciones precisas de la Formación Ayabacas (Callot, 2008) situándola en el intervalo Turoniano - Coniciario (~89 Ma) correlacionándola con la Formación Chonta, mientras que el Grupo Yanaoco, queda asignado para los rangos Albiano - Cenomaniano (Callot, 2008) en posible correspondencia con la edad del Grupo Oriente también del Subandino Peruano.



Foto 11. Afloramiento mostrando la base de la formación Yanaoco (368 - 8351), con presencia de clastos de naturaleza cuarzosa superiores a los 0.5 cm (Acosta, 2001).



Foto 12. Imagen mostrando la disposición de los clastos subredondeados en una matriz calcárea atribuido a la Formación Ayabacas (ALT-117).

Al tope de la distribución de la unidad Ayabacas, se deposita la Formación Vilquechico caracterizando por presentar niveles predominantemente limolíticos, con intercalaciones de areniscas y yeso sellando la secuencia previamente deformada y dando inicio al contexto de una cuenca de antepaís. Cabe indicar que el rango de distribución de esta unidad se acentúa hacia el borde oeste del área de estudio, y a su vez dicha secuencia se encuentra datada entre el rango de Campaniano Superior - Maastrichtiano (Jaillard et al., 1993) correlacionable con las unidades del vecino país del Sur, Chaunaca y Molino.

Finalmente, las secuencias terciarias que han sido previamente cartografiadas por otros autores (Newell 1949, Audebaude et al. 1978, Jaillard et al. 1993, Sempere 2000, entre otros), como Formación Muñani, Grupo Puno, entre otras; en el presente trabajo se ha tratado de sintetizar dichas divisiones y denominarlas Secuencias Terciarias, debido a que el enfoque del presente trabajo no es estudiar a detalle las unidades estratigráficas aflorantes del área, sin embargo consideramos muy importante realizar análisis a detalle de dichas secuencias para poder comprender mejor la historia de la cuenca enfocada en establecer y delimitar la generación de las trampas; y activación de los sistemas petroleros del Altiplano Peruano. Dicho esto, las mencionadas secuencias se encuentran caracterizadas principalmente por importantes depósitos continentales, provenientes de la Cordillera Occidental y Oriental (Sobel et al., 2003) rellenando a su vez la cuenca de antepaís previamente formada.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CUENCA TITICACA

4.1. GENERALIDADES	74
4.1.1. Fajas Plegadas y Corridas	75
4.2. ANÁLISIS DE SUPERFICIE	80
4.2.1. Análisis de Imágenes Landsat y Mapas de Elevación Digital	81
4.2.2. Análisis del Mapa Geológico	83
4.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA Y DE POZOS	87
4.4. SECCIÓN BALANCEADA REGIONAL	92
4.4.1. Construcción de la Sección Estructural	92
4.4.2. Sección Balanceada Regional	98

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CUENCA TITICACA

4.1. GENERALIDADES

El Altiplano es una gran cuenca intramontañosa de los Andes Centrales del Perú, de Bolivia y Argentina, situada entre las Cordilleras Occidental y Oriental. Se extiende sobre 2.000 km de largo y 200 km de ancho aproximadamente, a una altitud variando de 3.700 a 4.600 metros. (Lavenu & Sebvier, 1991).

En el desarrollo de este trabajo, hemos podido identificar claramente dentro del Altiplano Peruano, el dominio predominante de una morfología correspondiente a una Faja Plegada y Corrida, denominada para el presente trabajo, Faja Plegada del Altiplano (Fig. 49) que se extiende hacia el Sur, al territorio boliviano, con el nombre de Faja Plegada de Huarina; y a partir de los estudios realizados que se muestran en los apartados posteriores, hemos podido datar y corroborar la información precedida del levantamiento de esta unidad morfoestructural.

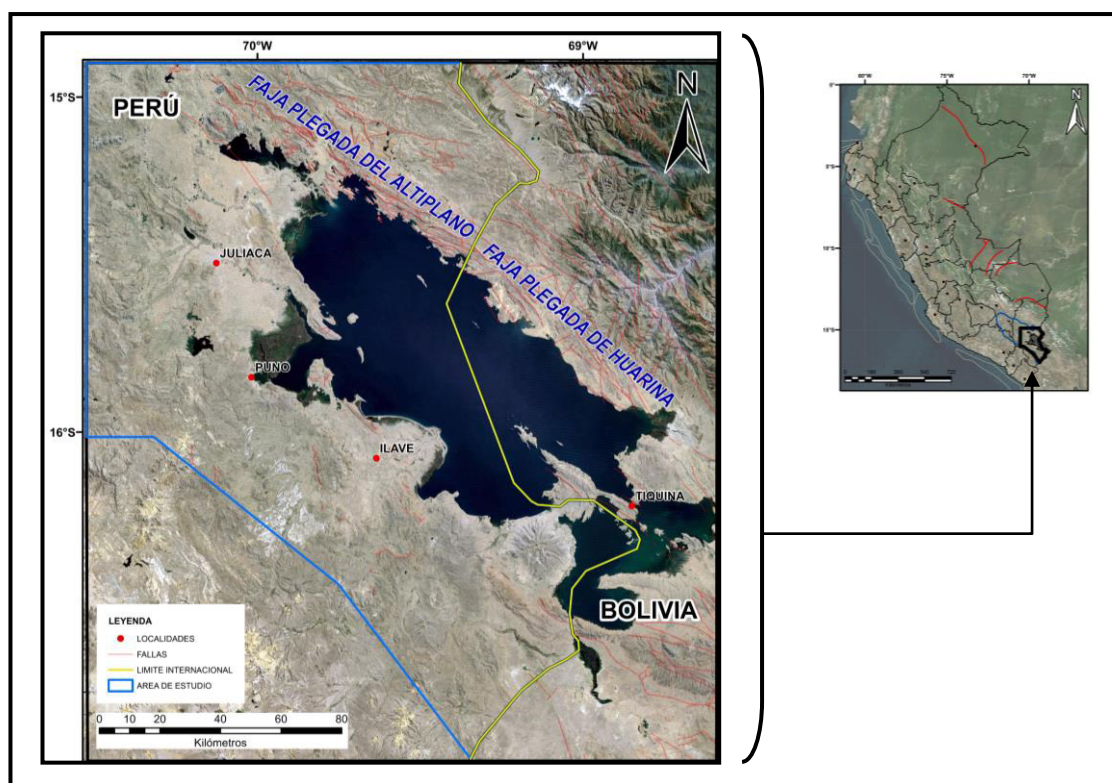


Fig. 49. Ubicación y extensión regional de la principal unidad morfo-estructural del área de estudio.

Antes de poder explicar las diferentes características estructurales de la zona de estudio, es necesario entender que nos ubicamos en un contexto con un dominio principal de elementos compresivos que se reflejan en la estructuración de una Faja Plegada y Corrida (FPC), la cual acarrea múltiples conceptos así como innumerables estudios que tratan de explicar la deformación asociada a ésta. Sentado dicho preámbulo, a continuación limitaré nociones fundamentales de la misma, para que las interpretaciones a mostrar puedan ser comprendidas con total claridad.

4.1.1. Fajas Plegadas y Corridas

La corteza terrestre se deforma para acomodarse al continuo movimiento de placas que sucede en el globo terrestre. Es así que las rocas son sometidas tanto a grandes esfuerzos compresivos, como a relajamientos y extensiones importantes. Las fajas plegadas y corridas (*fold and thrust belts*) se vinculan a los primeros y se desarrollan principalmente en los márgenes convergentes de placas, esto es, en zonas de subducción tipo andina o en zonas de colisión continental: aunque también se registran en menor proporción en márgenes pasivos (Fig. 50). Las estructuras más características de dichas fajas son los pliegues, las fallas inversas y corrimientos (Cristallini, 1998).

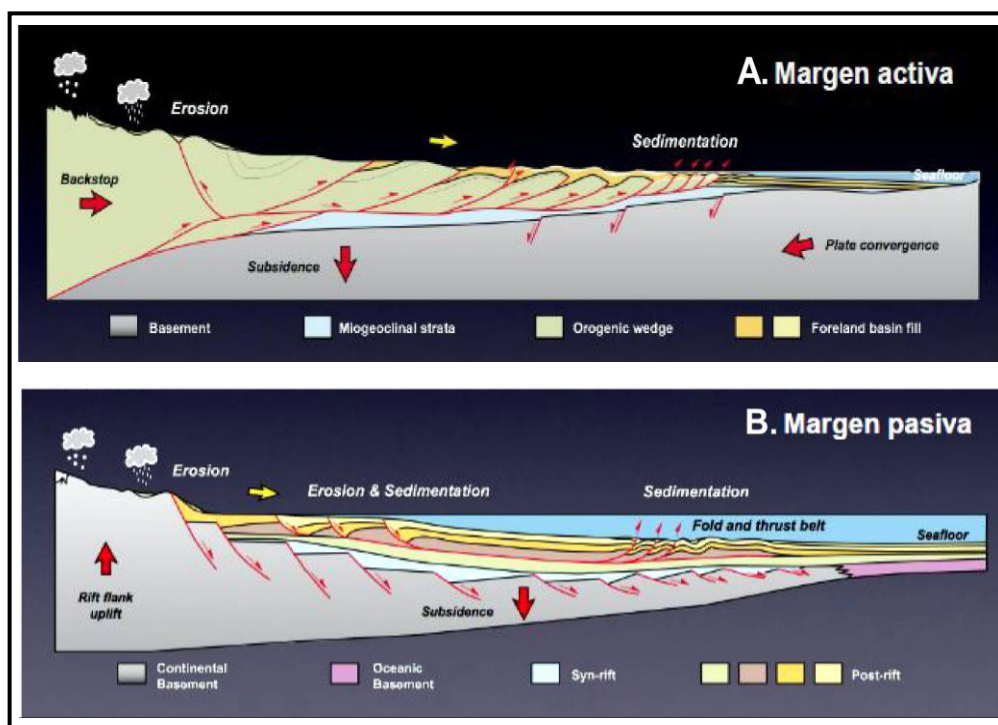


Fig. 50. Esquema de la morfología de las Fajas Plegadas y Corridas, tanto en márgenes activos (A) como en márgenes pasivos (B) (Witt, 2011).

La clasificación de los estilos estructurales de las FPC quedan definidas a partir de los niveles involucrados en la deformación, definiéndose así dos modelos distintos, tectónica de piel delgada y tectónica de piel gruesa. (Rodgers, 1971; Burg, et al., 2011)

La tectónica de piel delgada (*Thin-skinned tectonics*) es aquella en la que no se involucra el basamento en la deformación y el movimiento transmitido es a lo largo de un nivel de despegue basal usualmente relacionado a evaporitas, lutitas o sedimentos que están sometidos a altas presiones. Los niveles basales de despegue de este grupo en general no exceden los 7-8 km de profundidad. En contraste, la tectónica de piel gruesa (*Thick-skinned tectonics*), asociado a fallas inversas con alto ángulo, involucra rocas de basamento, con un movimiento usualmente transmitido a lo largo de un nivel de despegue crustal (Fig. 51) (Cristallini, 1998; Burg et al., 2011).

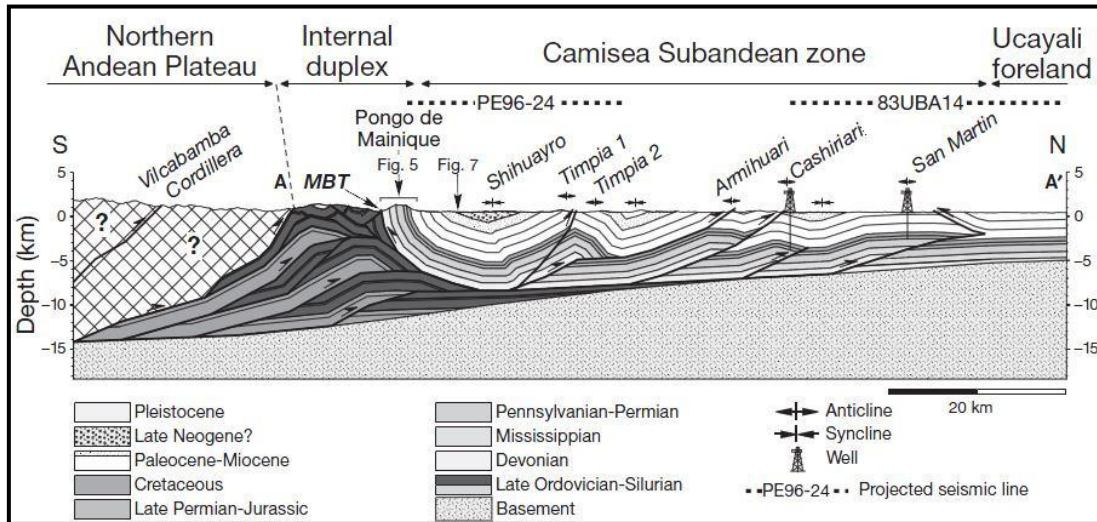


Fig. 51. Desarrollo de una sección estructural considerando la deformación existente asociada una tectónica de piel delgada (Espurt et al., 2011).

La trayectoria de un corrimiento es el camino por el cual dicha superficie se desplaza a través de las distintas capas sedimentarias. Cuando nos referimos de dichos desplazamientos en un contexto de tectónica de piel delgada (Fig. 52), el camino que sigue el corrimiento queda definido por una trayectoria tipo "escalera" (*staircase trajectory*) alternando entre "pisos" (*flats*) y "rampas" (*ramps*).

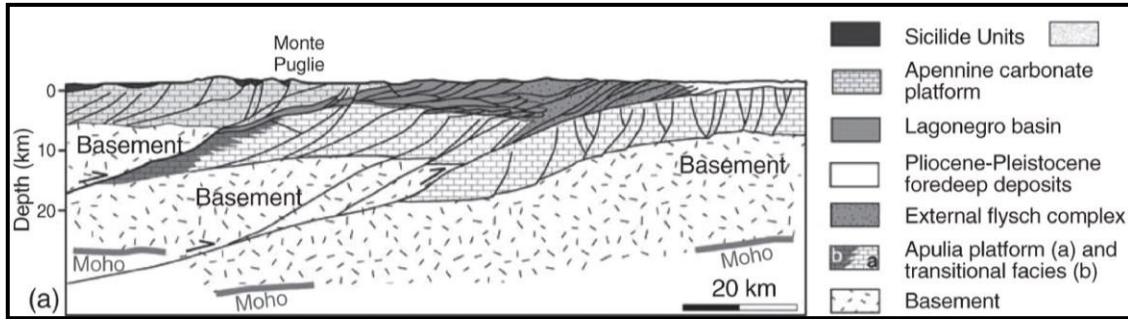


Fig. 52. Desarrollo de una sección estructural considerando la deformación existente asociada una tectónica de piel gruesa (Scrocca, 2010).

Existen muchas estructuras que pueden ser definidas a partir de sistemas de corrimientos, sin embargo para el presente trabajo ahondaremos en dos de éstas, sistemas de imbricaciones y sistemas en *duplex*, puesto que consideramos que sirven de base para la posterior comprensión tanto de los demás apartados como para entender las distintas configuraciones tectónicas en ambientes compresivos.

Los sistemas en *duplex* son estructuras generalmente localizadas en zonas con alta deformación, desarrolladas comúnmente en áreas con coberturas sedimentarias espesas, acomodando acortamientos significativos. Es un sistema de cabalgamiento que se encuentra limitado entre la base y el tope por niveles de despegue, generado a partir de la existencia de varias superficies plásticas. (Fig. 53) (Modificado de Shaw et al., 1999; Mitra S., 1986, Boyer & Elliot, 1982).

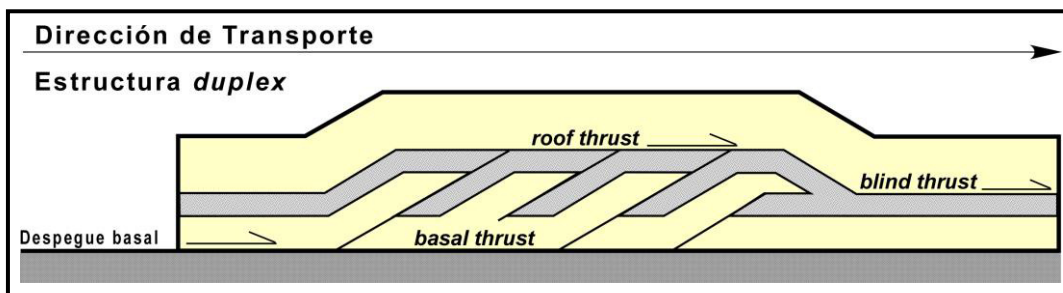


Fig. 53. Modelo característico de la estructura tipo duplex.

Los sistemas de imbricaciones, son cabalgamientos superpuestos cuya diferencia principal con los sistemas en *duplex*, es que no presentan un nivel de despegue superior común. Es posible formarlos a partir de sistemas en *duplex* cuyo despegue superior ha sido erosionado, caracterizado por presentar una separación entre los cabalgamientos, asociado a una posible rampa profunda mostrando una secuencia de deformación (Fig. 54) (Modificado de Shaw et al., 1999; Mitra S., 1986, Boyer & Elliot, 1982).

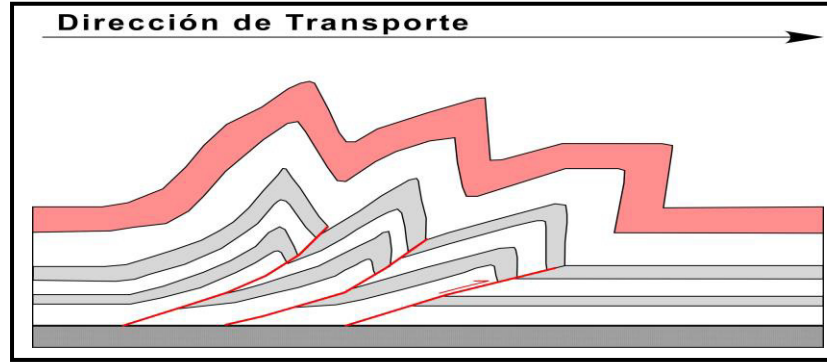


Fig. 54. Modelo característico de la estructura tipo imbricación.

Las fallas y pliegues caracterizan la estructura de una faja plegada y corrida y en general se encuentran íntimamente relacionados entre sí. Es así, que en las FPC, en general predominan estructuras mixtas de plegamiento y fallamiento. El estudio de los modelos principales teóricos de pliegues relacionados a fallas es fundamental a la hora de interpretar una estructura natural (Cristallini, 1998). Por dicho motivo conocer los pliegues asociados a las fallas de corrimientos es preponderante para poder entender las interpretaciones que se muestran en los apartados posteriores, por lo cual, a continuación detallaremos las principales estructuras mencionadas (Fig. 55).

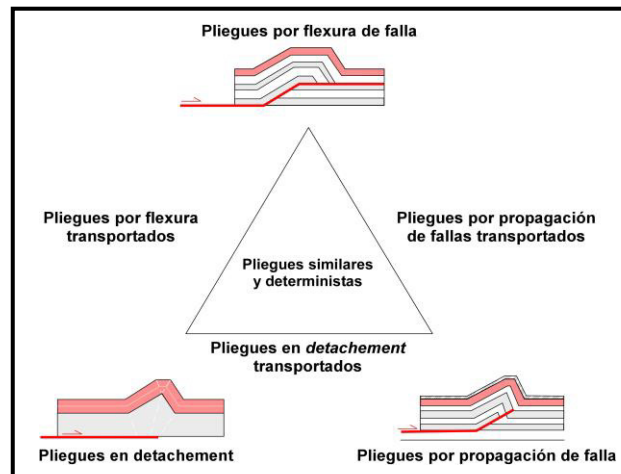


Fig. 55. Esquema de los principales pliegues asociados a la morfología de las fallas (Witt, 2011).

Si la superficie de una falla no es plana, los bancos que se mueven por encima de ella tienen que acomodarse a su forma (Cristallini, 1998). Los pliegues de flexión de falla o también llamados *fault-bend folds* son aquellos que se forman como resultado del movimiento de un bloque de falla a lo largo de una superficie de falla no planar (*rampa*), lo cual causa la flexión del bloque de falla y por lo tanto la formación del pliegue (Fig. 56). Aunque por lo general se forman en el bloque superior de la falla, pueden desarrollarse también en el bloque inferior o en ambos bloques (Rich, 1934; en Poblet, 2004).

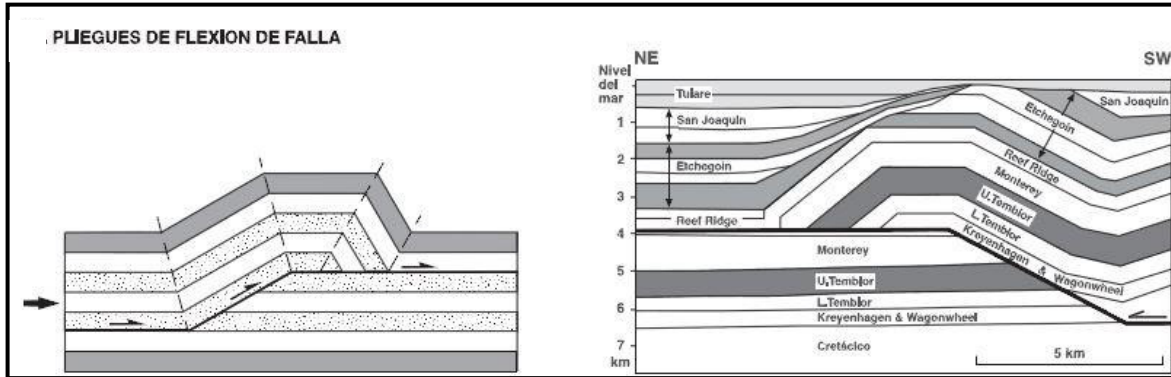


Fig. 56. Modelo de un pliegue por flexión de falla (Poblet, 2004).

Los pliegues de flexión de falla revisados anteriormente no son muy eficientes para explicar estructuras con limbos frontales volcados sin apilar muchas rampas, sin embargo es muy común encontrar en la naturaleza pliegues volcados vinculados a una sola falla. Suppe y Mendweleff (1990) propusieron un modelo de pliegue-falla que puede explicar este tipo de casos y que denominaron plegamiento por propagación de falla (*fault-propagation fold*) (Cristallini, 1998). Estos pliegues se forman contemporáneamente a la propagación de una falla en situación de rampa a través de una serie de estratos, de forma que el acortamiento de lugar a la formación de un pliegue en la zona próxima a su terminación (Fig. 57) (Dahlstrom, 1969; en Poblet, 2004).

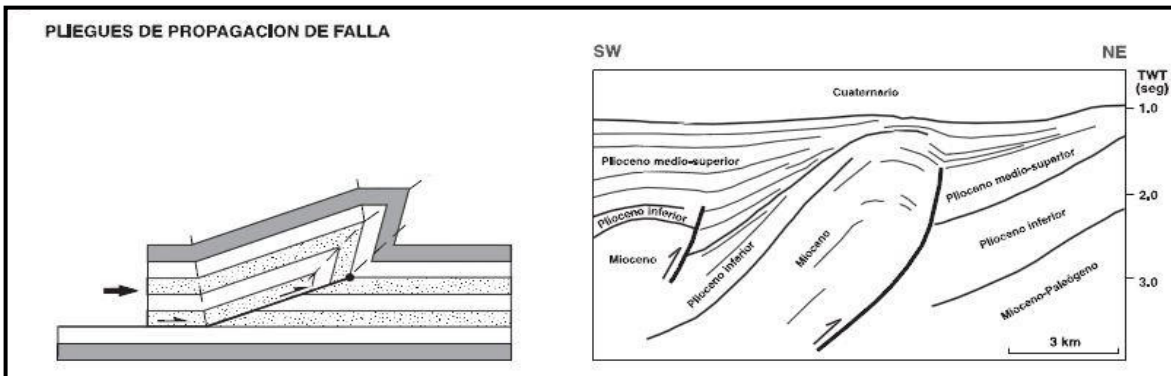


Fig. 57. Modelo de un pliegue por propagación de falla (Poblet, 2004).

Los pliegues de despegue (*detachment folds*), a diferencia de los pliegues de flexión o de propagación de falla, no están asociados con una rampa en la falla, sino que se forman en relación con un cabalgamiento paralelo de las capas (Fig. 58). Pueden generarse en la zona próxima a la terminación de un cabalgamiento si se produce una disminución brusca en la cantidad de desplazamiento a lo largo de este. Los pliegues de despegue pueden estar limitados por un despegue inferior, por uno superior o por ambos. (Chamberlin, 1910 en Poblet, 2004).

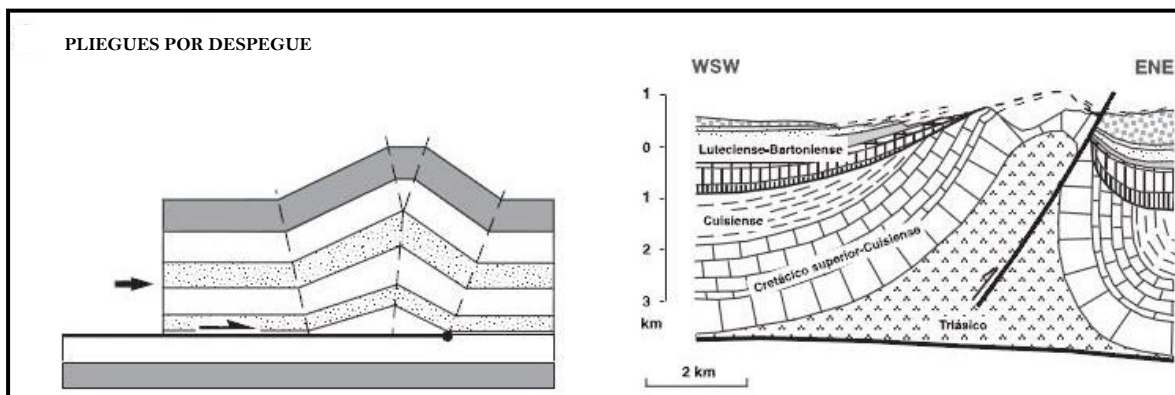


Fig. 58. Modelo de un pliegue por despegue (Poblet, 2004).

4.2. ANÁLISIS DE SUPERFICIE

Para poder evaluar a detalle, y gestar un modelo ecuánime del Altiplano Peruano, es necesario integrar toda la información existente tanto de subsuelo (data sísmica, magnetométrica y/o gravimétrica) como de superficie (imágenes LANDSAT, mapas de elevación digital y/o mapas geológicos) para generar un modelo que pueda explicar la configuración estructural del área de estudio.

Dicha esta cuestión, a continuación detallaremos las interpretaciones realizadas en base a la información de superficie que sirvió de base, para poder elaborar el modelo mostrado en el presente estudio.

4.2.1. Análisis de Imágenes Landsat y Mapas de Elevación Digital

Las imágenes LANDSAT así como los mapas de elevación digital (DEM), fueron de gran ayuda debido a que la distribución de la información del subsuelo es minúscula a comparación del alcance del estudio, sumado a esto, la mala calidad de las mismas; fueron factores que dificultaron el avance sostenido del proyecto, pero que fueron subsanados apoyados en las interpretaciones de las mencionadas herramientas, así como de los análisis de los relevamientos geológicos.

Las imágenes LANDSAT - 90 m (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>) fueron de gran utilidad para la evaluación de la cuenca, debido a que nos ayudaron a definir con exactitud las áreas más relevantes donde realizar el trabajo de campo, así como a partir de éstas y apoyados en mapas geológicos previos, generarnos un cartografiado de la zona de estudio, respetando los principales lineamientos estructurales, a partir de los distintos tipos de imágenes tanto de 03 como de 07 bandas espectrales. Es necesario entender que las distintas combinaciones de las bandas espectrales realizadas en este trabajo, sirvió de base para poder extender el control geológico a zonas donde, debido a los problemas sociales, se hace sumamente complicado el acceso a los afloramientos.

Con referencia al trabajo realizado con la información satelital, dichas imágenes LANDSAT (Fig. 59) sirvieron de base para poder integrarlo con nuestra información GIS, y así generarnos mapas demarcando la configuración de la cuenca.

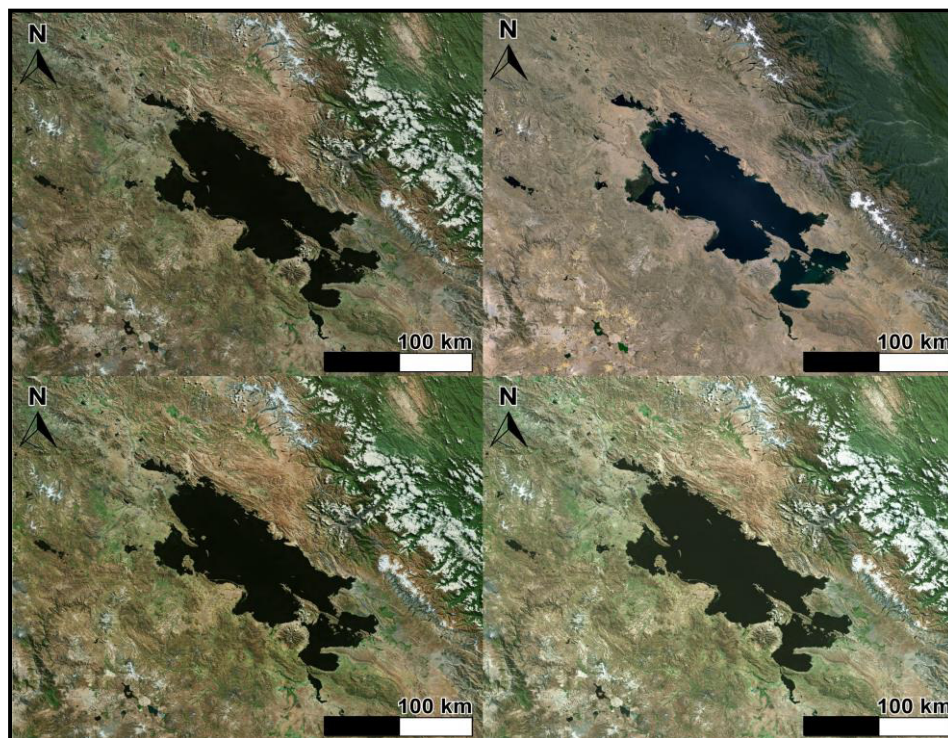


Fig. 59. Contraste de los distintos mapas LANDSAT utilizados (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

El trabajo realizado a partir de la información DEM, obtenida a partir de la web de la NASA (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>), fue al igual que las imágenes LANDSAT, de gran utilidad debido a que se pudo determinar las principales unidades morfo-estructurales dentro del proyecto, cabe decir, fallas o pliegues significativos para tener nociones claras de la disposición de las unidades geológicas. Como es apreciable en el mapa, se evidencia un gran dominio de corrimientos al borde oeste del lago Titicaca, corroborando nuestra información previa de la configuración tectónica de la zona (Fig. 60).

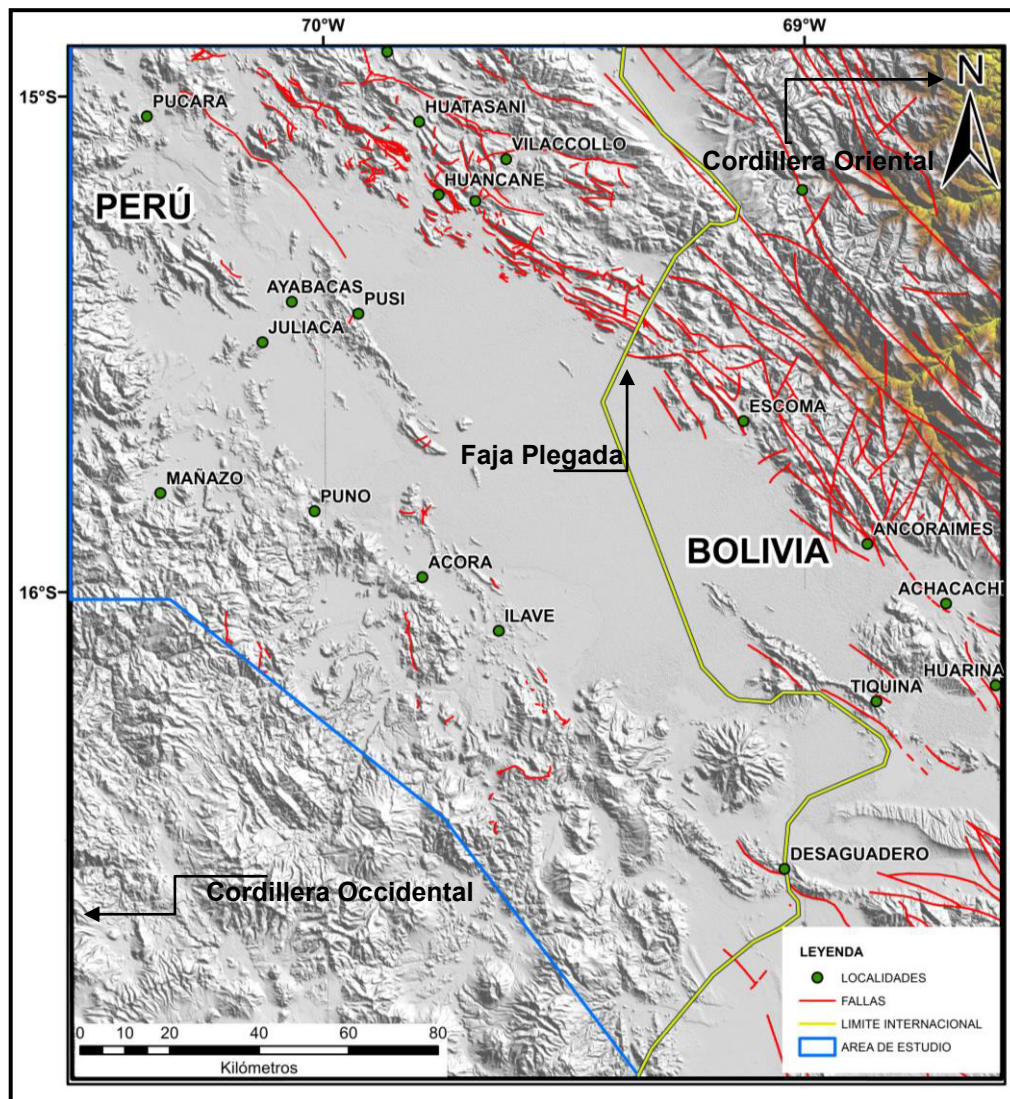


Fig. 60. Distribución de las fallas reconocidas apoyadas en el Modelo de Elevación Digital (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>).

A su vez la superposición de ambas imágenes (Fig. 61) genera que resalte con mayor intensidad los distintos cambios litológicos así como acentúa la identificación de las unidades estructurales, llámese pliegues o fallas dentro de la zona de estudio, pudiendo apoyar con esta información al cartografiado geológico con mayor relevancia.

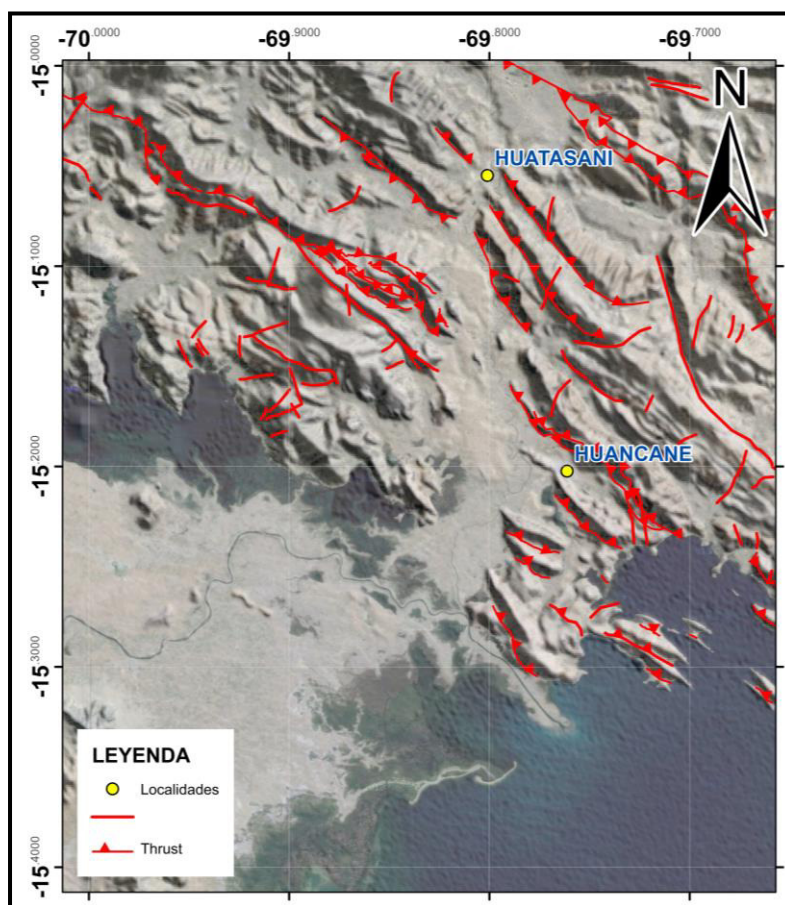


Fig. 61. Ejemplo del trabajo efectuado, superponiendo las imágenes satelitales con los DEM's. Nótese que facilita la interpretación de elementos estructurales en el área.

4.2.2. Análisis del Mapa Geológico

Para poder entender la disposición de las unidades, así como generarnos una idea sostenida de las características estructurales del área de estudio, es necesario realizar a detalle un minucioso análisis de los mapas geológicos que poseemos, por tal motivo se realizó dicha observación a los mapas publicados por autores como Acosta (2001) o PERUPETRO S.A. (2008) así como la carta geológica y/o cuadrángulos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET (32-v, 31-v, 32-x, 31-x, 30-x) para generarnos un primer enfoque de la distribución de las secuencias estratigráficas.

A partir de dichos análisis, así como los análisis previos de información de imágenes LANDSAT y Mapas de Elevación Digital (DEM) y claro está, apoyados esencialmente en nuestro *fieldtrip* que fue detallado en el capítulo anterior, hemos podido generar un mapa geológico del área de estudio (Fig. 62), identificando las principales tendencias de distribución de las unidades estratigráficas, así como delimitar los elementos estructurales (pliegues, fallas) destacados en el trabajo mostrado.

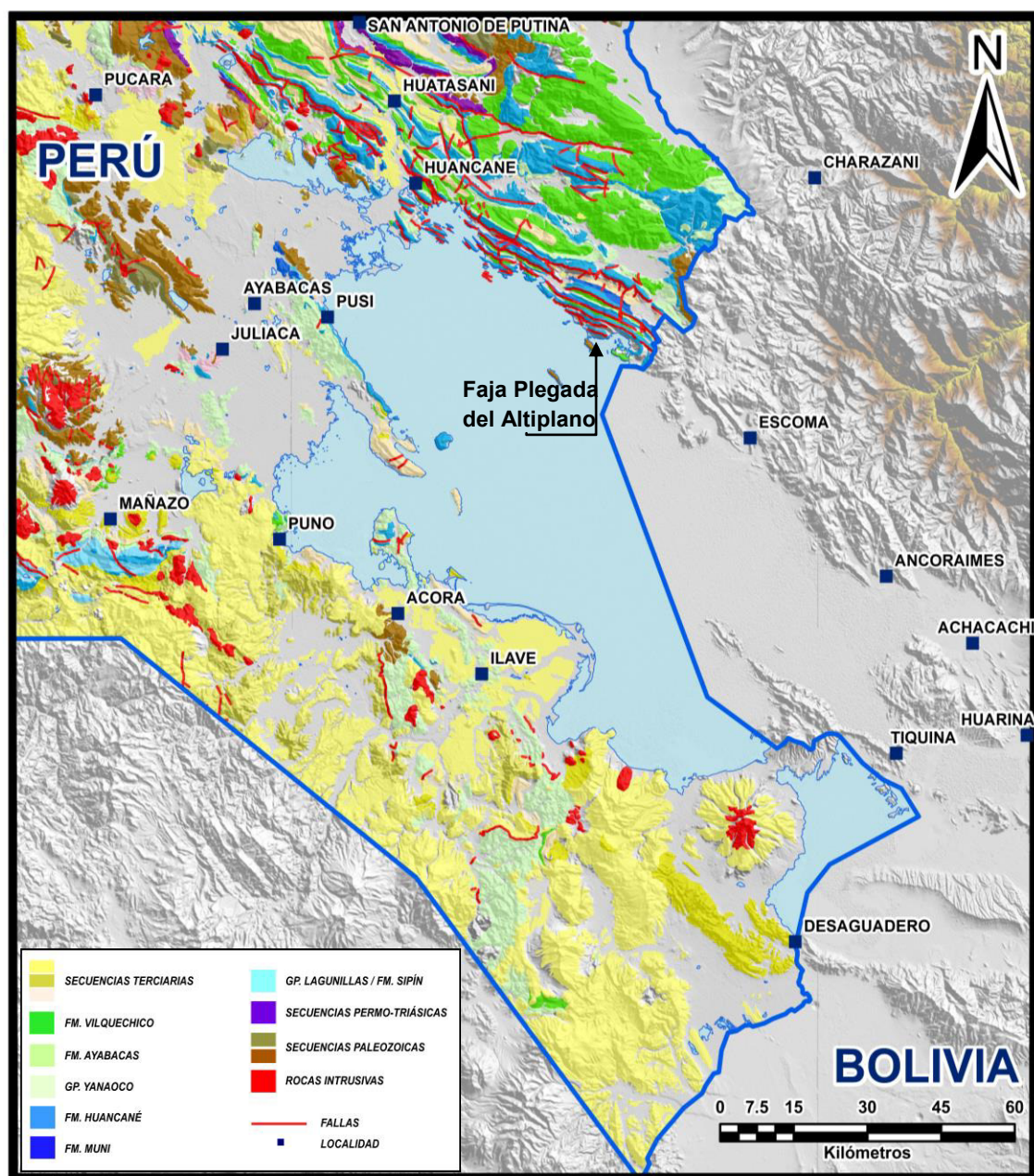


Fig. 62. Mapa geológico del área de estudio.

Como se muestra en el mapa geológico, se puede señalar dos dominios claros de distribución geológica; siendo el de la parte oriental comprendido en la unidad morfoestructural denominada previamente *"Faja Plegada del Altiplano"* (Fig. 63), con una clara disposición de secuencias jurásicas, cretácicas y terciarias; mientras que hacia el lado occidental, encontramos preponderantemente niveles terciarios, que para la realización de este trabajo, fueron agrupados indistintamente, señalando también presencias importantes de la formación Ayabacas así como cuerpos intrusivos.

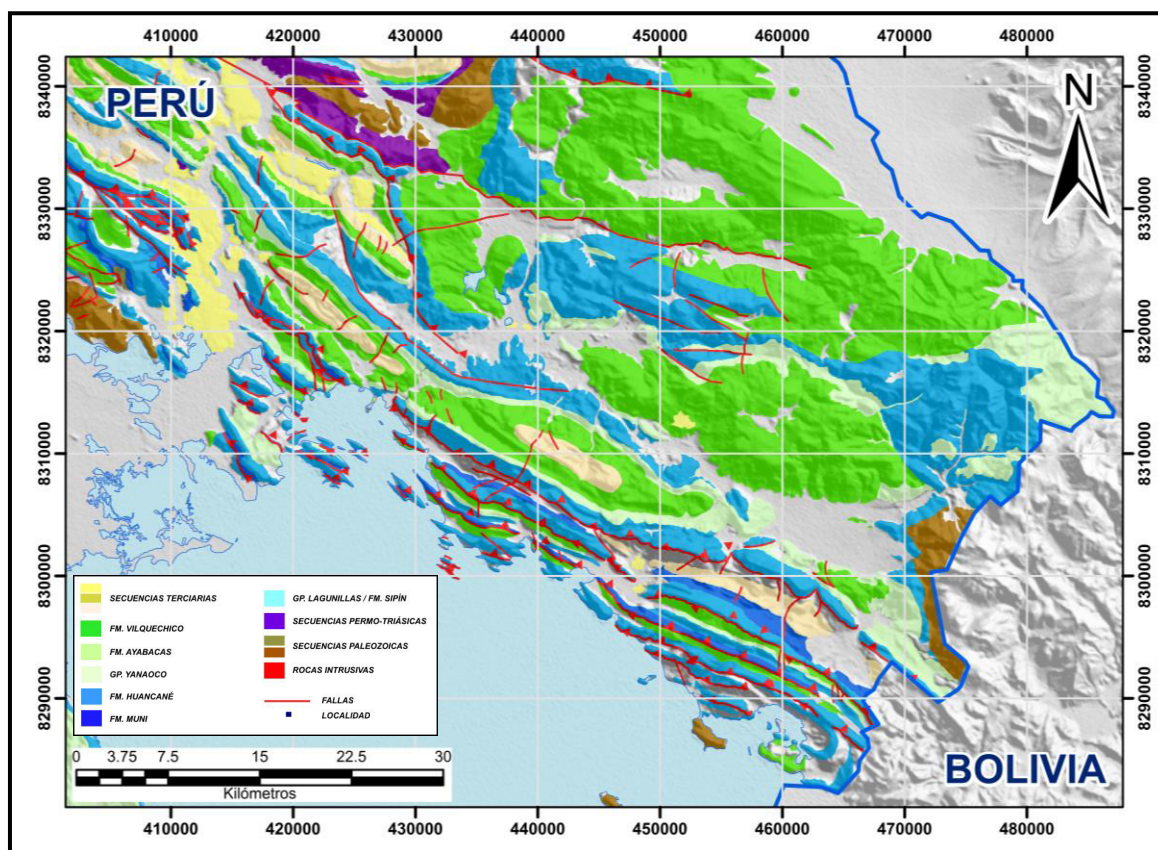


Fig. 63. Mapa geológico mostrando la Faja Plegada del Altiplano, que conforma el borde oriental para el presente trabajo.

Entrando a detalle, hacia el borde oriental del Lago Titicaca, apreciamos el sistema de faja plegada caracterizada por presentar diversas repeticiones, tomando como base el nivel de despegue jurásico, conocidos como la formación Muni, descrito en capítulos anteriores. Dicha unidad, se encuentra ampliamente distribuida a lo largo de la zona de estudio, acompañado de unidades sedimentarias también jurásicas y cretácicas principalmente. Es importante señalar también la presencia de un sinclinal característico (con núcleo terciario), ubicado cerca de la localidad de Vilquechico (425990-8317672) el cual puede ser fácilmente identificado, debido también a la extensión lateral que presenta. Interesante detalle que puede ser extraído de la presentación del mapa, es la poca distribución de unidades paleozoicas con cercanía a la zona central de este flanco del Altiplano, razón que puede ser explicada debido al ya comentado nivel de despegue jurásico, que mantiene niveles más antiguos en profundidad. Sin embargo, se aprecia mayor exposición de secuencias paleozoicas, con dirección a la Cordillera, debido a que, como sabemos el levantamiento de los Andes guarda estrecha relación con estos bloques.

Con referencia a la región occidental del área de estudio, donde ubicamos al Yacimiento Pirin (Fig. 64), podemos observar la gran extensión de depósitos terciarios, así como la distribución de cuerpos paleozoicos lateralmente a la disposición del Lago Titicaca, infiriendo la presencia de éstos en profundidad. Siendo minuciosos en el análisis se observa mayor densidad de sedimentos jurásicos inferiores, Grupo Lagunillas, hacia la zona de Mañazo, corroborando esto a lo expuesto previamente, que dicha unidad se asocia depósitos post-rift, cuyo eje se encuentra al oeste del sector.

Como se manifiesta, la disposición de las unidades sedimentarias, pueden ser cómodamente segmentadas en dos fracciones, sin embargo es necesario entender que dichas secuencias se encuentran íntimamente relacionadas con el comportamiento tectónico de la cuenca.

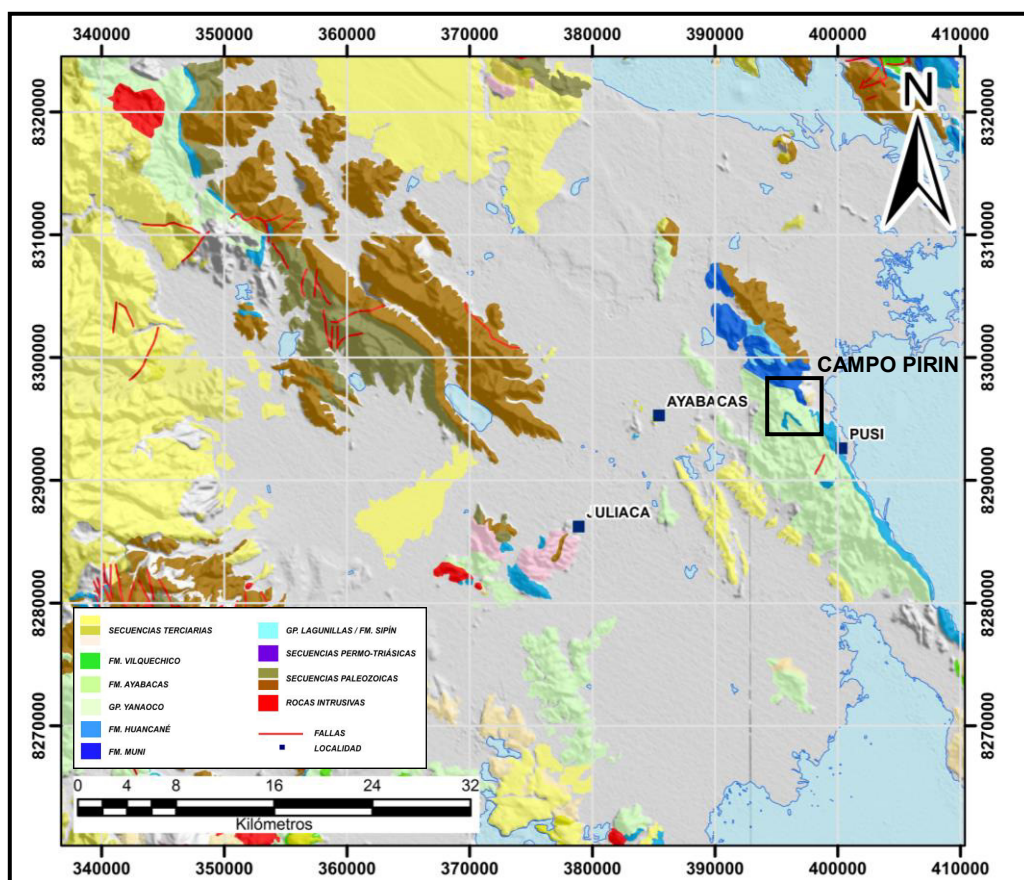


Fig. 64. Mapa geológico mostrando el borde occidental del sector, donde ubicamos al otrora Yacimiento Pirin.

4.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA Y DE POZOS

En la cuenca altiplánica peruana, se encuentran registrados 1452.8 km de información sísmica adquiridas en 03 campañas sísmicas (Fig. 65), tales como la de YUGSOJ9496LS4, PTASOJ9194LS2 y la de PTASOJ92LS3, y 45 pozos (previamente mencionados). Sin embargo es necesario mencionar, que más de 1200 km de data sísmica es de mala calidad; motivo por el cual en el 2007 la compañía Siboil S.A., reprocesa alrededor de 900 km de dicha información, obteniendo, resultados no muy alentadores. Es importante señalar también que los trabajos realizados fueron enfocados únicamente en el borde occidental de la cuenca.

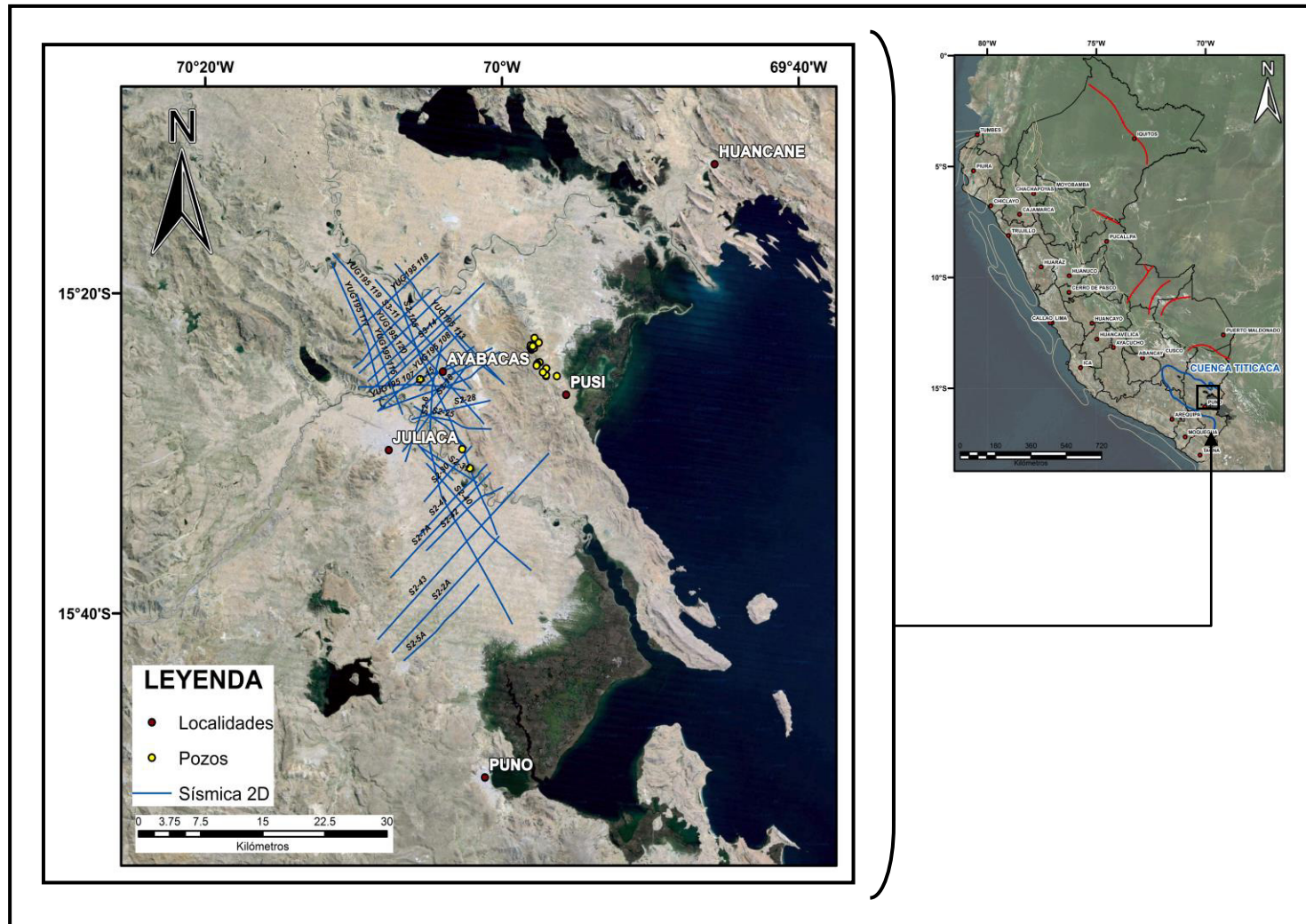


Fig. 65. Ubicación de la información de subsuelo en el área de estudio.

Para el presente trabajo, se realizó la interpretación de la línea longitudinal S2-41 para el entendimiento de la sección regional, puesto que la mencionada sísmica se encuentra inmersa en el desarrollo del corte (Fig. 66). Sin embargo, considero importante mostrar parte de la demás información reprocesada para que se pueda observar la calidad de las mismas (Fig. 67), y explicar que el criterio que se tomó para interpretar sólo esta sísmica, se debe a que es superlativa (a pesar de sus falencias) a comparación de las demás; más aún es posible generar mayores trabajos de interpretación, pero al presentar la data una paupérrima calidad, el trabajo no sería óptimo.

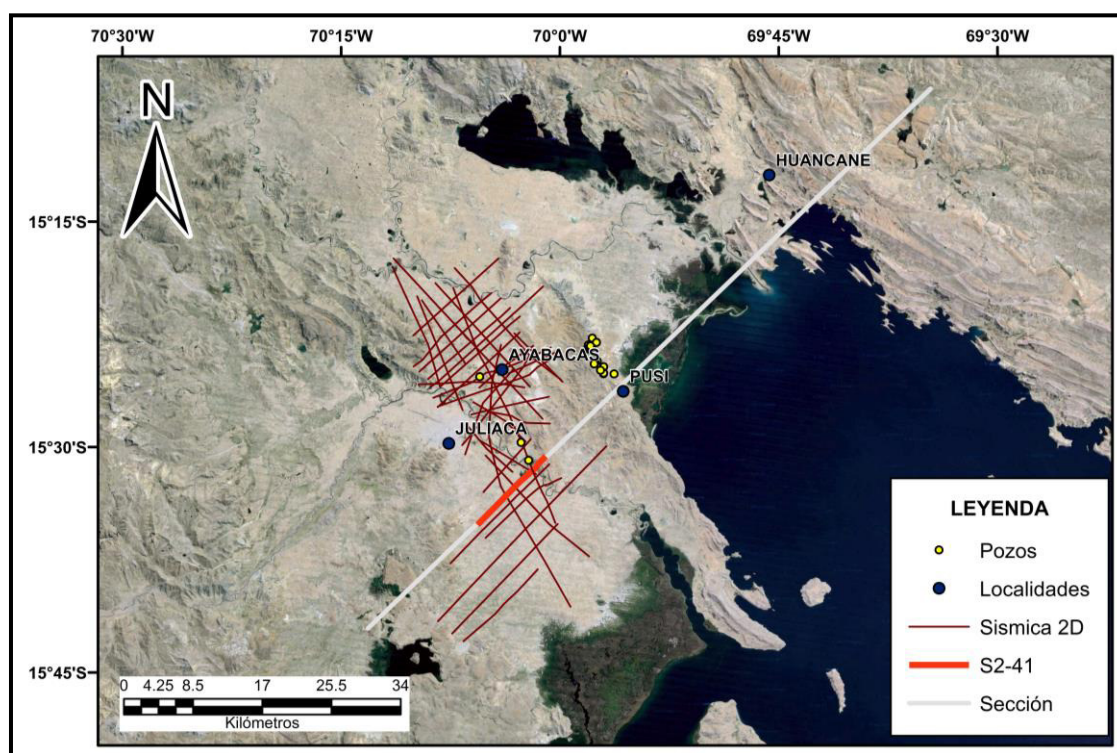


Fig. 66. Ubicación de la línea sísmica S2-41 y de la sección estructural regional construida en el proyecto.

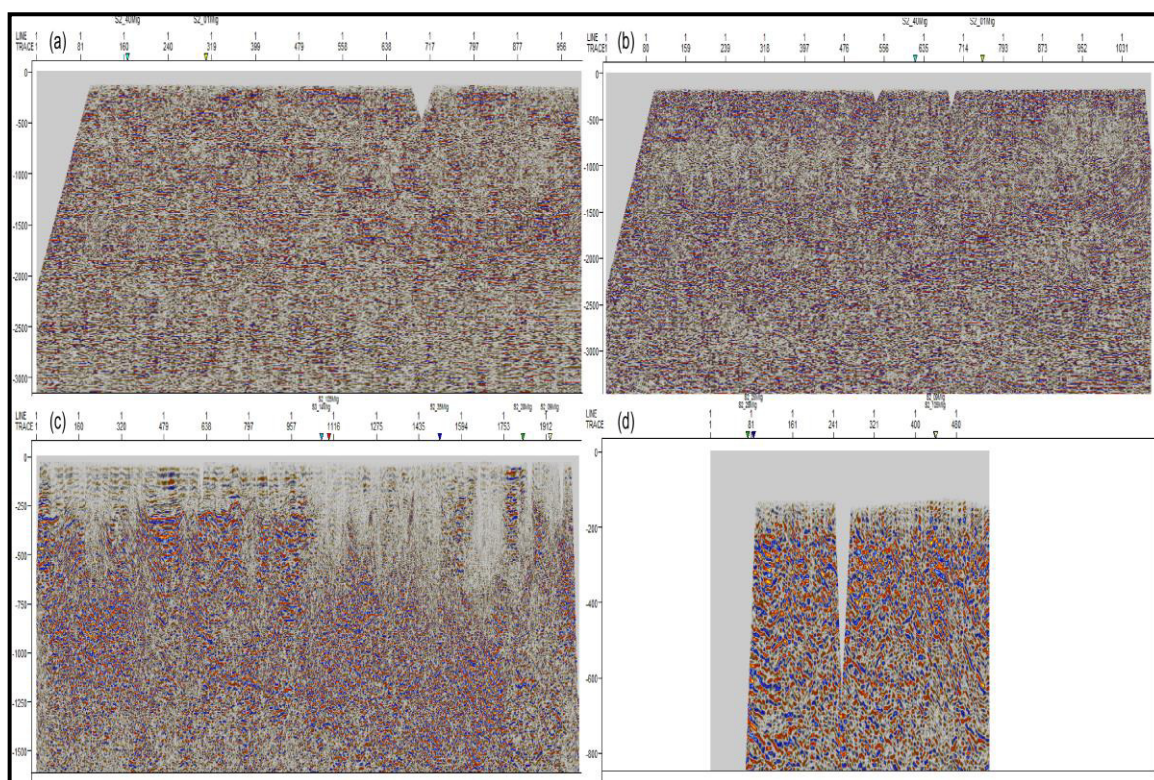


Fig. 67. Imagen mostrando la mala calidad de la información sísmica existente, tomadas como ejemplo (a) S2-02 (b) S2-05 (c) S3-11 (d) S2-29.

Para poder explicar la interpretación sísmica de la línea SY-41 perteneciente a la campaña PTASOJ9194LS2, previamente es necesario entender los pasos para poder calibrar la data; tanto con el pozo, datos de superficie y parámetros geofísicos, para así generar el adecuado cimiento para los trabajos posteriores.

"La calibración de las secciones sísmicas en formato SEG-Y se desarrolló con la información sísmica de PTASOJ9194LS2, el "datum" del procesamiento y las correcciones del origen de tiempos de disparo.

El proceso para realizar la calibración de la sísmica se describe a continuación. Primero: Con respecto a la orientación de la línea sísmica. Para esto, deberemos contar con la sísmica en digital (formato SEG-Y) y en papel, siendo este último el dato real del procesamiento. Se compara en ambos formatos el sentido de la toma de información de los "shotpoints" y se contrasta la sísmica en digital con la de papel.

Segundo: con respecto al datum. Con el registro sísmico en papel se extrae la información del datum del procesamiento, el cual nos ayudara a fijar la topografía con la línea sísmica. A continuación, se hace coincidir nuestro tiempo que figura en la línea sísmica de papel que a su vez está asociado al datum de procesamiento- con la topografía, permitiendo fijar ésta última obteniendo así una línea sísmica bien ubicada en el espacio.

La calibración de la línea sísmica con un pozo cercano, Coata 1X, se realiza mediante el diagrama sintético de velocidades, que se genera a partir de un registro sísmico. Dicho pozo se encuentra adyacente a la línea sísmica, manteniendo un buen control de las series sedimentarias en profundidad y las que afloran en superficie, permitiendo junto con las líneas sísmicas y los datos de campo la interpretación de las mismas.

La calibración de la sísmica con datos estructurales de superficie, trabajados en el software Move, se realizó basándose en los levantamientos de campo previamente mencionados, imágenes satelitales y el DEM del terreno. Los datos estructurales definieron el control geológico de los afloramientos. Las imágenes satelitales permitieron seguir los alineamientos de los afloramientos a nivel regional y el DEM ayudó a definir los cortes topográficos, fijar el datum y calibrar la línea sísmica.

Las diferentes formas de calibrar la sísmica, realizadas en este trabajo, permitieron definir y fijar la geometría de las fallas y de los cuerpos sedimentarios, siendo estas fases necesarias para realizar un corte estructural balanceado." (Modificado de Allca, 2007)

Con lo que respecta a la interpretación sísmica de la línea S2-41 (Fig. 68), dicha sección presenta una longitud de 11.890 km con orientación SW - NE, en la que observamos que nos encontramos en un ambiente compresivo, dominado claramente por la geometría de una faja plegada y corrida.

En la sección, apreciamos dos anticlinales asociados a pliegues por propagación de fallas, en la que se destaca un despegue basal, por debajo de las unidades jurásicas, y probablemente ligado a secuencias paleozoicas superiores. Se puede observar también hacia el flanco oeste, la continuidad lateral de este nivel de despegue, de manera análoga con el flanco este.

Con referencia a los niveles terciarios, se pueden apreciar hacia el flanco occidental, la presencia de *onlaps* que sellan el pliegue por propagación de falla; así mismo un relleno sedimentario, identificable como un sinclinal en el subsuelo, posiblemente asociado a los levantamientos de las estructuras al este de la sección. Es distinguible también que la estructural del flanco oriental, puede ser contrastada con la morfología de las secuencias terciarias en superficie.

Dicha información, nos permitió dilucidar la compleja estructuración al flanco este del lago Titicaca, que sirvió de base para poder construir la sección balanceada mostrada a continuación.

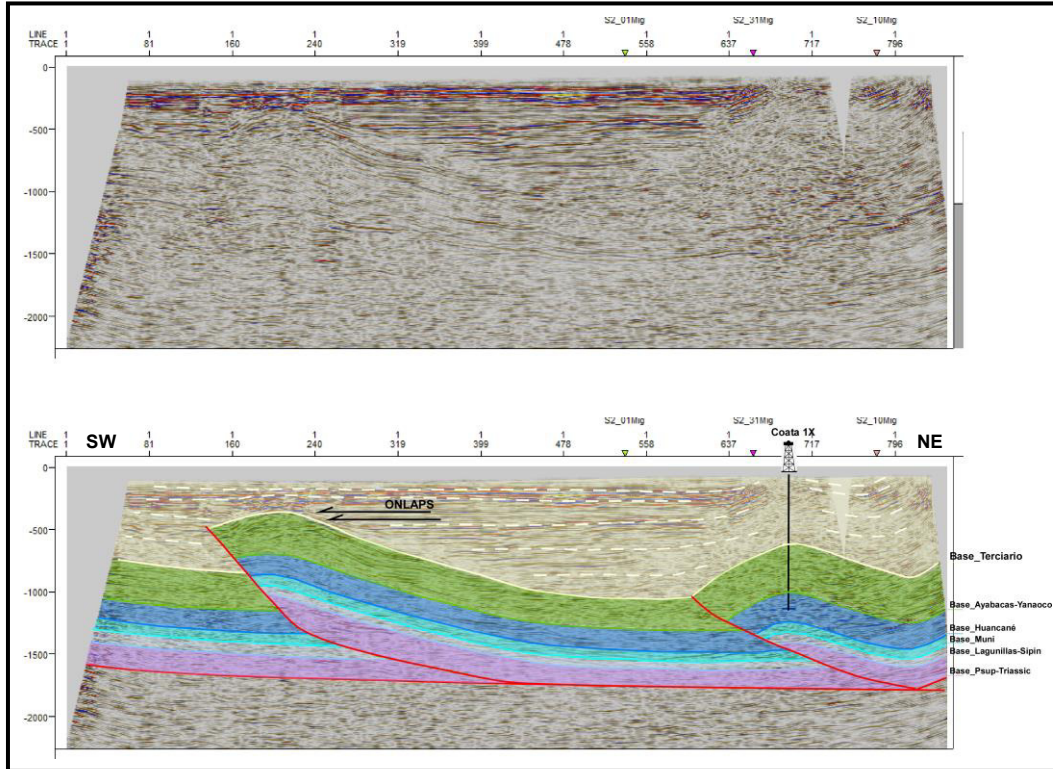


Fig. 68. Interpretación de la línea sísmica S2-41 desarrollada para el presente proyecto.

4.4. SECCIÓN BALANCEADA REGIONAL

Previo al desarrollo de una sección balanceada, es necesario generar la construcción de una sección con todos los datos estructurales a lo largo de la zona estudio. Por dicho motivo a continuación, detallaremos los pasos relacionados a su elaboración.

4.4.1. Construcción de la Sección Estructural

Es necesario mencionar que para la realización del corte estructural a desarrollarse en el software Move (Midland Valley), es importante tener todos nuestros datos proyectados en valores de profundidad, siendo más específicos previo a nuestra construcción, necesitamos generar la conversión tiempo-profundidad de nuestra línea sísmica. Por dicho motivo, es necesario explicar los fundamentos requeridos para la realización de dicha labor.

4.4.1.1. Conversión Tiempo - Profundidad a partir de las velocidades RMS

Para poder generar una conversión tiempo - profundidad de nuestra línea sísmica, fue necesario poder recolectar las velocidades de procesamiento sísmico de la misma y realizar distintos trabajos con ellas; para el caso mostraremos el flujo de trabajo realizado con la finalidad de obtener una conversión óptima.

El primer paso a realizar, como fue mencionado, es la recolección de las velocidades RMS de la información sísmica existente, ubicadas comúnmente en la parte superior de nuestra sección sísmica en papel (Fig. 69), la cual servirá de base para las operaciones posteriores.

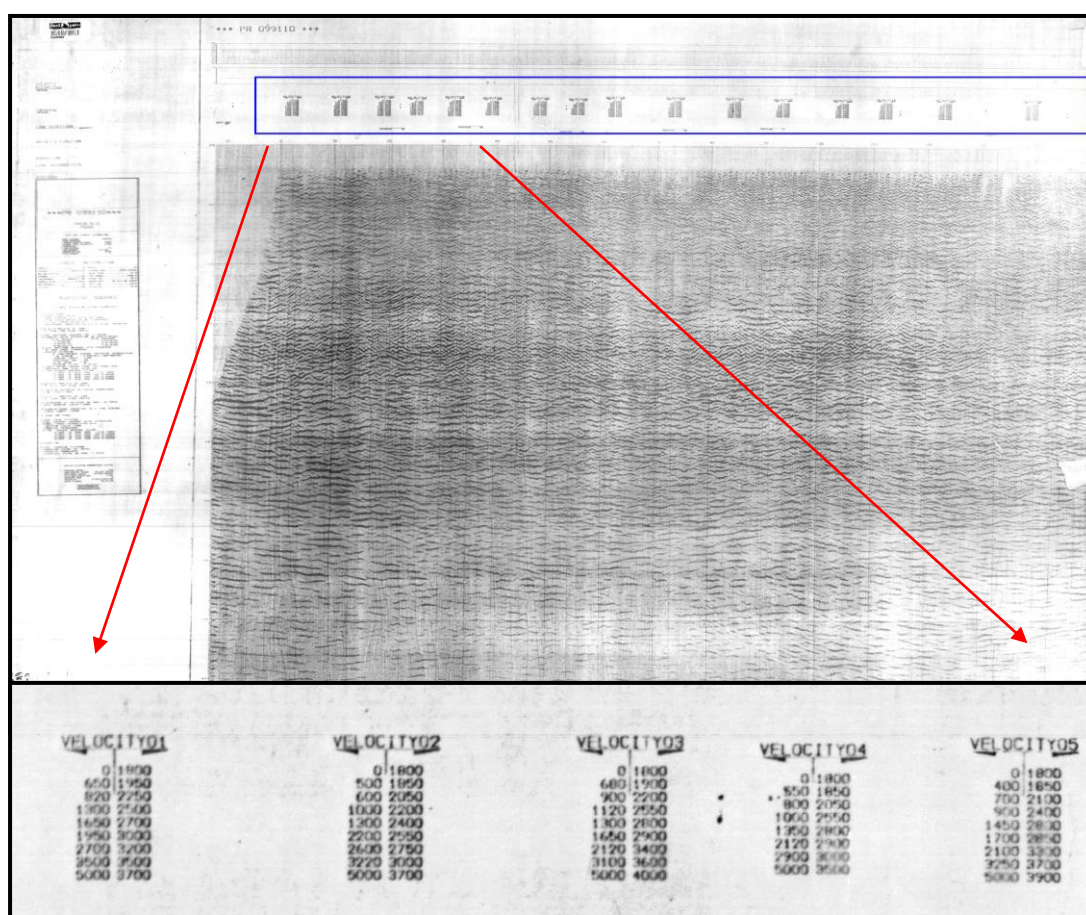


Fig. 69. Línea sísmica 99-110, tomada como ejemplo para mostrar la recolección de la información de las velocidades RMS.

Con los datos de velocidades y tiempo que fueron obtenidos a partir de la sísmica en papel, la siguiente medida es agrupar toda la información en tablas de muestreo, las cuales servirán para la generación de gráficas tiempo - profundidad interpolando dichos valores (Fig. 70); así mismo podremos obtener el cálculo de la constante k a partir de la relación entre los valores de velocidades iniciales y de fondo ($k = V_0 / V_f$), necesaria para poder realizar el proceso de conversión el software 2Dmove (Fig. 71).

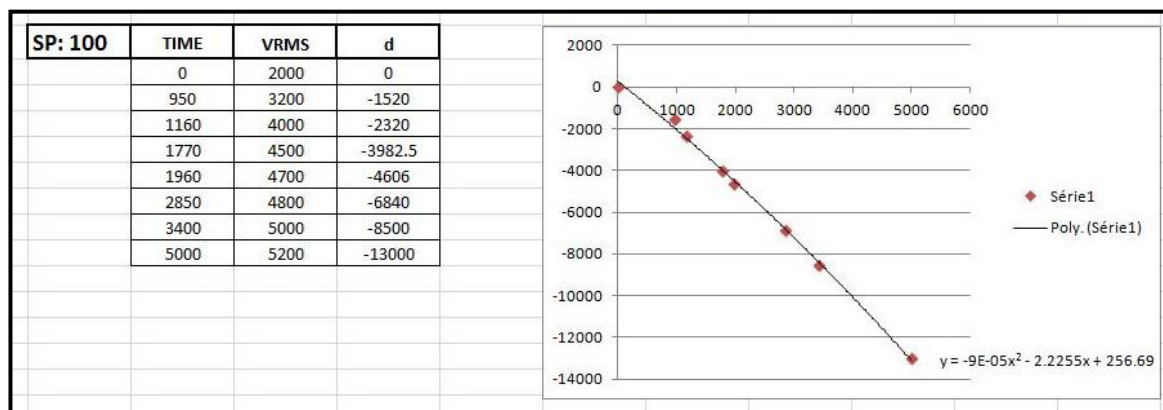


Fig. 70. Modelo del tratamiento de la información en una hoja de cálculo, generando así el diagrama tiempo - profundidad de la línea en cuestión.

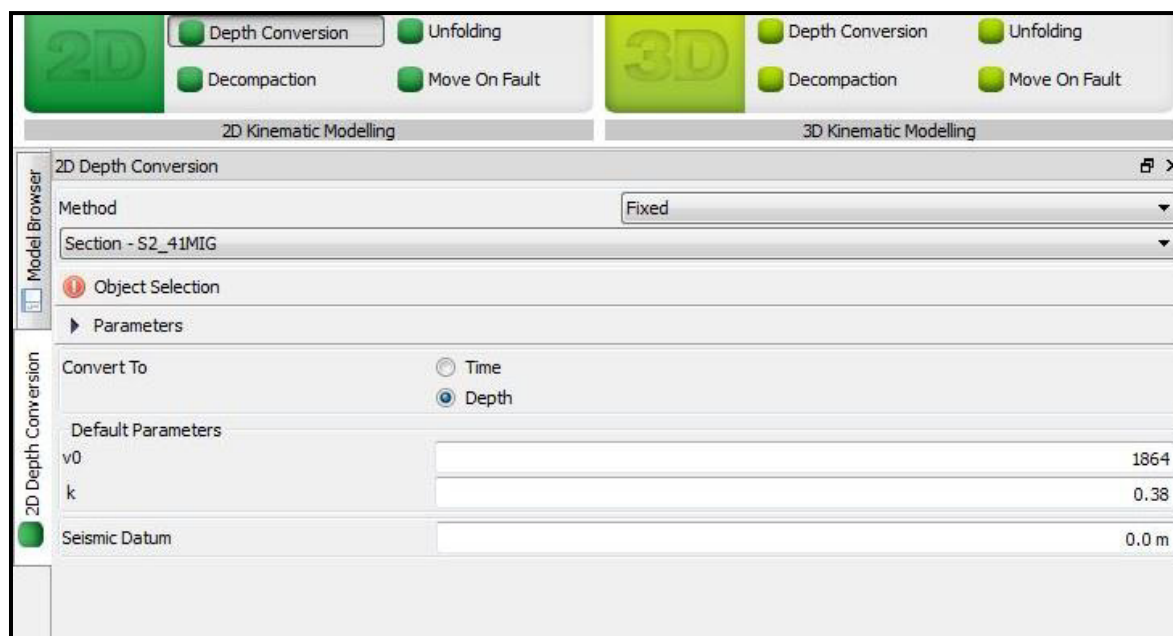


Fig. 71. Interfaz de conversión de la línea sísmica a partir del análisis del V_0 y la constante k para el presente proyecto.

Finalmente, el resultado que muestra dicha conversión (Fig. 72) es de vital importancia para poder continuar con la interpretación estructural en el área de estudio.

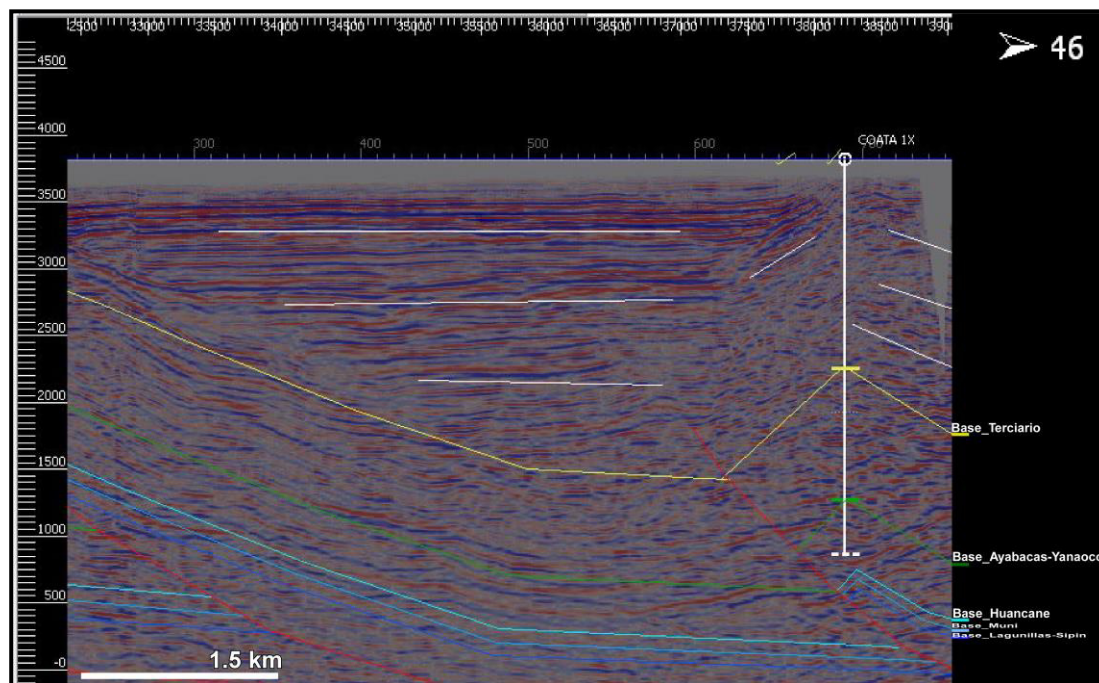


Fig. 72. Imagen mostrando la importancia de una correcta conversión para continuar con el desarrollo de la interpretación de la sección estructural.

4.4.1.2. Sección Estructural: Altiplano Peruano

La elaboración de la sección estructural fue efectuada con el software Move de la compañía Midland Valley, plataforma en la cual pudimos integrar tanto información de superficie como de subsuelo.

La sección estructural realizada entre las localidades de Machacmarca (368877 - 8263455) y Calancachi (438280 - 8329993) (Fig. 73); tomó como referencia información de los Cuadrángulos de INGEMMET (32-v, 31-v, 32-x, 31-x, 30-x), datos de campo de las campañas IRD - PPT (2006-2007) así como la realizada en el presente trabajo, IRD - YPFB (2014), así mismo se integró con la línea sísmica S2-41, y la proyección de los pozos Coata 1X y RH - 1. (Fig. 74)

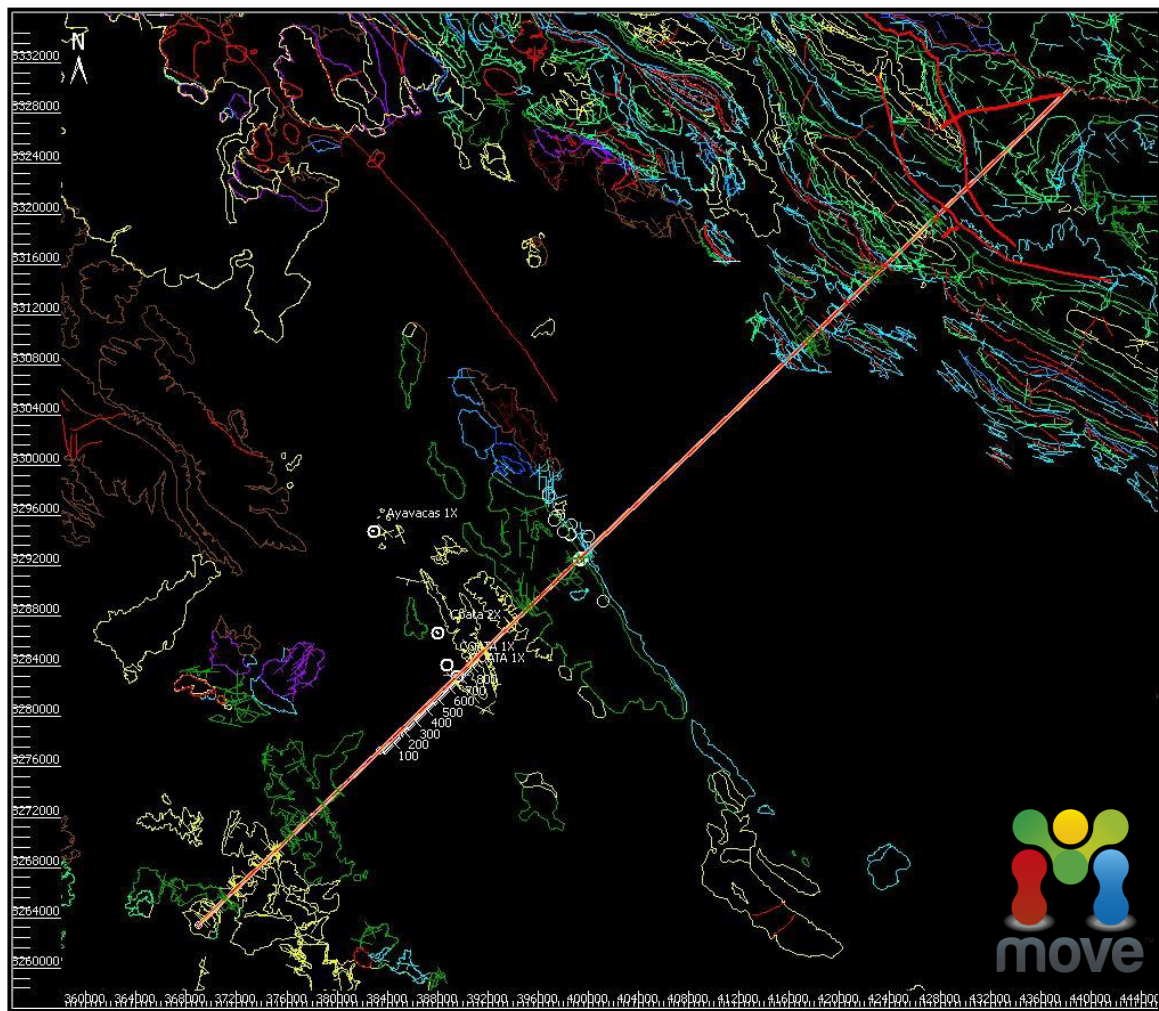


Fig. 73. Ubicación de la sección estructural desarrollada en el proyecto.

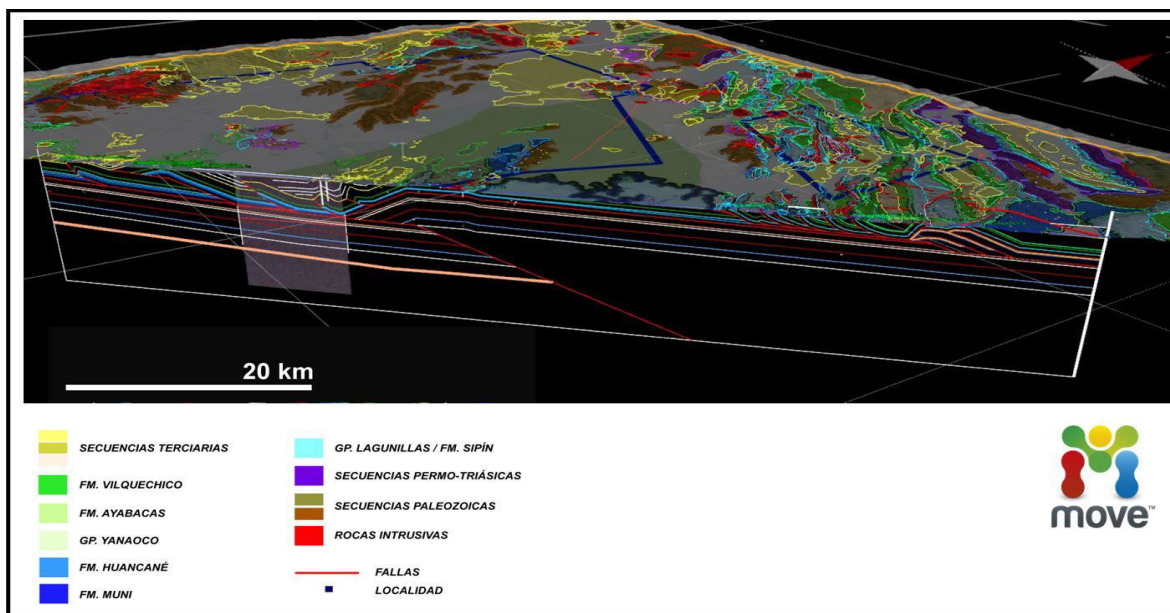


Fig. 74. Sección estructural desarrollada en el proyecto actual.

Cabe recalcar que tanto para el sector occidental (Fig. 5) como el oriental (Fig. 6), los datos han sido calibrados con la información existente, sea data sísmica, pozos y/o datos de superficie; que pueden ser contrastados con el mapa geológico correspondiente.

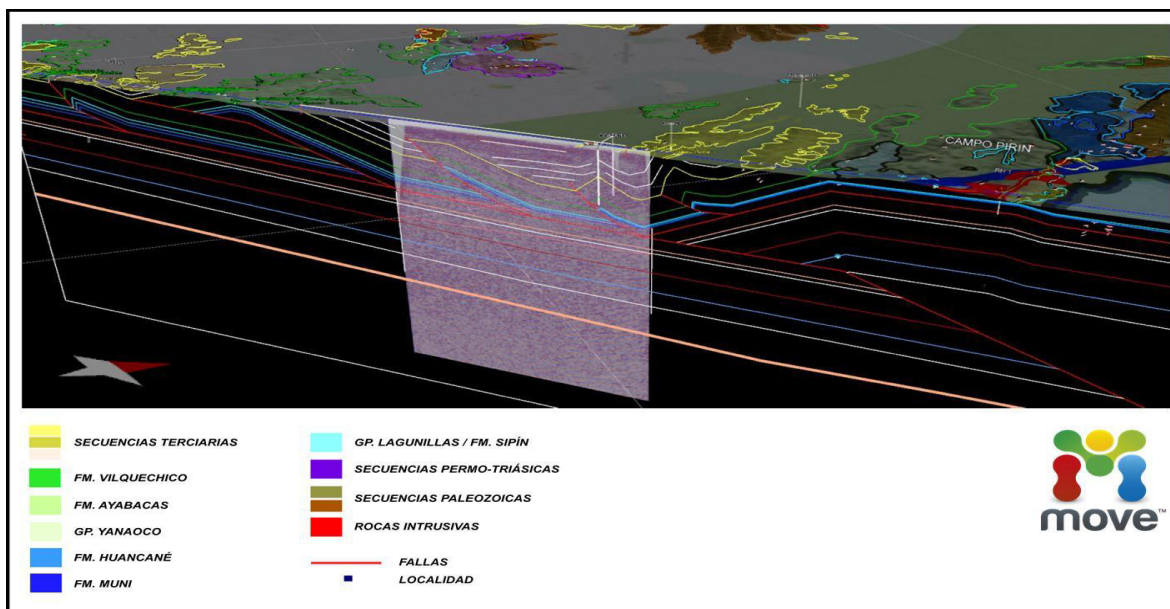


Fig. 75. Sección estructural desarrollada en el proyecto, enfocada en mostrar el borde occidental (Campo Pirin). Nótese que la información superficial contrasta adecuadamente con la interpretación realizada.

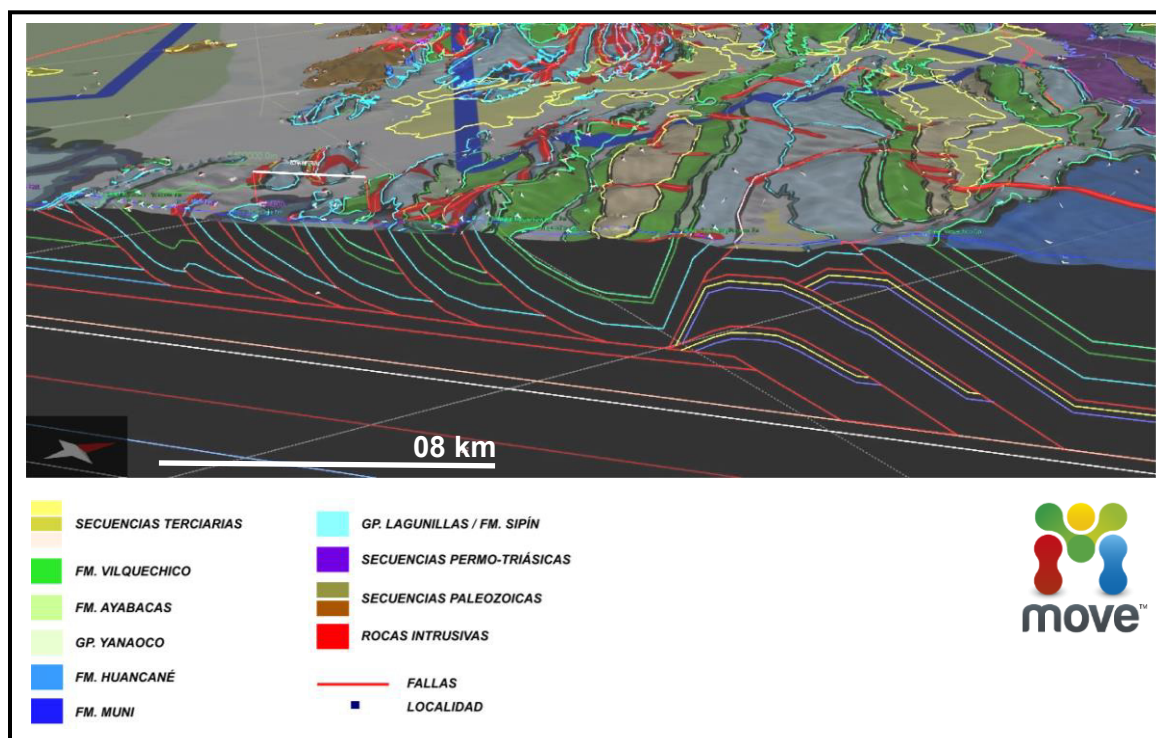


Fig. 76. Sección estructural desarrollada en el proyecto, enfocada en mostrar el borde oriental (Faja Plegada del Altiplano). Nótese que la información superficial contrasta adecuadamente con la interpretación realizada.

4.4.2. Sección Balanceada Regional

4.4.2.1. Generalidades

El balanceo de secciones estructurales permite obtener reconstrucciones *retrodeformables* del subsuelo que satisfacen el principio de conservación de masa (Dahlstrom, 1969). Las secciones balanceadas han ayudado a entender estructuras y relaciones complejas en cinturones de pliegues y cabalgaduras (Hossack 1979; Suter, 1981; Suppe, 1983). Esto es de aplicación inmediata en la industria del petróleo debido a que los cinturones orogénicos contienen estructuras ideales para acumular y producir hidrocarburos. A pesar de que esta es una idea simple y elegante, la construcción de una sección estructural balanceada no garantiza que ésta sea una representación correcta de la geometría del subsuelo. Las secciones resultantes sólo son tan buenas como los datos utilizados y las suposiciones hechas durante su construcción. (Contreras-Pérez, 2010)

Es necesario tener en cuenta las restricciones fundamentales, que redacto en adelante, para considerar efectuar una sección estructural balanceada.

1. El volumen de rocas deformadas debe ser igual al de las rocas en su estado antes de la deformación. No se pierde ni se gana volumen. El balance de volumen es siempre posible pero difícil de operar en tres dimensiones, por ello se simplificó en balance de áreas. Si los pliegues son isópacos o paralelos, la conservación de las áreas se reduce a la conservación de la longitud de los estratos. Cuando en el plegamiento el clivaje es importante, surgen problemas de irrestituibilidad por pérdida de volumen. En estos casos la restitución deberá tener en cuenta niveles guías no afectados por clivaje para evaluar la pérdida de volumen de otros horizontes.
2. Las deformaciones estructurales deben ser restauradas a su estado no deformado. Este principio consiste en que las estructuras puedan *retrodeformarse* hasta el estado no deformado original sin que aparezcan anomalías.
3. La sección debe ser restaurada entre dos extremos o líneas fijas, las cuales al restaurar la sección deben mantenerse sin alteraciones importantes en su disposición respecto a los estratos. Estas líneas se ubican en áreas no deformadas o poco deformadas de la sección.
4. En la sección deformada todos los tramos que cortan la estratificación (rampas) o que se desplazan paralelamente a ella (planos) en la pared yacente deben tener sus equivalentes en la pared colgante para cada par de bloques separados y desplazados por falla. (Fig. 77)



Fig. 77. Restricción 04 en el desarrollo de la construcción de una sección balanceada

5. Al restaurar la sección las trazas de las fallas deben tener trayectorias razonables, es decir, no abruptas o que se rebatan en la posición contraria al transporte. Este criterio se basa en el postulado de que las fallas se forman cuando las capas se encuentran indeformadas, en su actitud original, y que cortan la estratificación hacia adelante y hacia arriba con respecto a la dirección de transporte del bloque superior (Fig. 78).

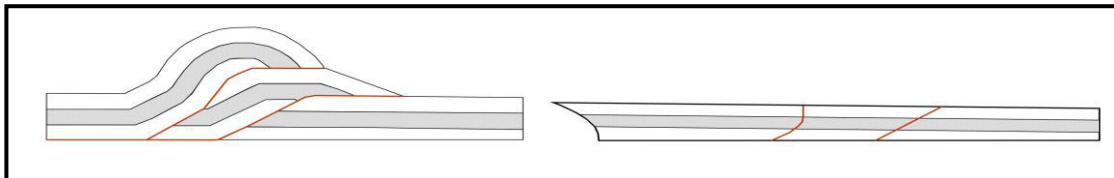


Fig. 78. Restricción 05 en el desarrollo de la construcción de una sección balanceada

6. Las interpretaciones posibles en un corte geológico están limitadas por los tipos de estructuras presentes en el área y por las características mecánicas de la columna estratigráfica involucrada en la deformación.

7. La deformación debe resolverse por encima del basamento estructural.

Considerando tales razones, es momento de conocer los métodos de reconstrucción utilizados en esta técnica estructural.

• **METODO DE LONGITUDES DE LÍNEAS ESTRATALES**

En las secciones con fallamiento y plegamiento paralelo, es decir con conservación de los espesores de los estratos, la conservación de las áreas se reduce a mantener los espesores y longitudes estratales. En estos casos el balance de masa se logra consiguiendo que todas las longitudes estratales entre líneas fijas sean iguales antes y después de la deformación. El método clásico consiste en controlar las longitudes estratales de una estructura entre líneas fijas auxiliares, respetando los datos disponibles y modificando la posición de fallas o de capas hasta lograr coincidencia de longitudes (Fig. 79). Es conveniente ubicar las líneas fijas en lugares donde exista el mínimo de cizalla interestratal que, en general, coinciden con las líneas de planos axiales de pliegues o con posiciones de retorno de los estratos a la pendiente regional (Cristallini, 1998). Es necesario mencionar que para el presente trabajo, se utilizó este método como referencia para la construcción del corte balanceado.

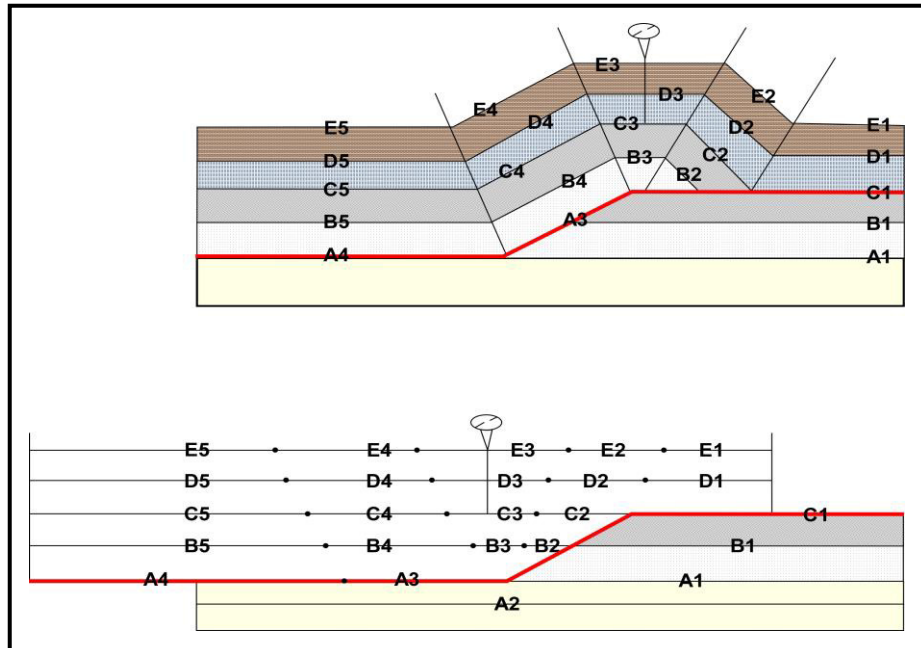


Fig. 79. Esquema del método de longitudes de líneas estratales.

• METODO DE BALANCE DE AREAS

Este método se aplica para unidades que no conservan sus espesores. Las áreas de un estrato o de una lámina de cabalgamiento medidas en una sección en el estado deformado deben permanecer iguales a las áreas medidas en la sección restaurada. El área de un conjunto rocoso puede ser medida por medio de planímetros, cálculos geométricos a partir de la subdivisión del área en formas simples, de manera digital o con papel milimetrado (Cristallini, 1998) (Fig. 80).

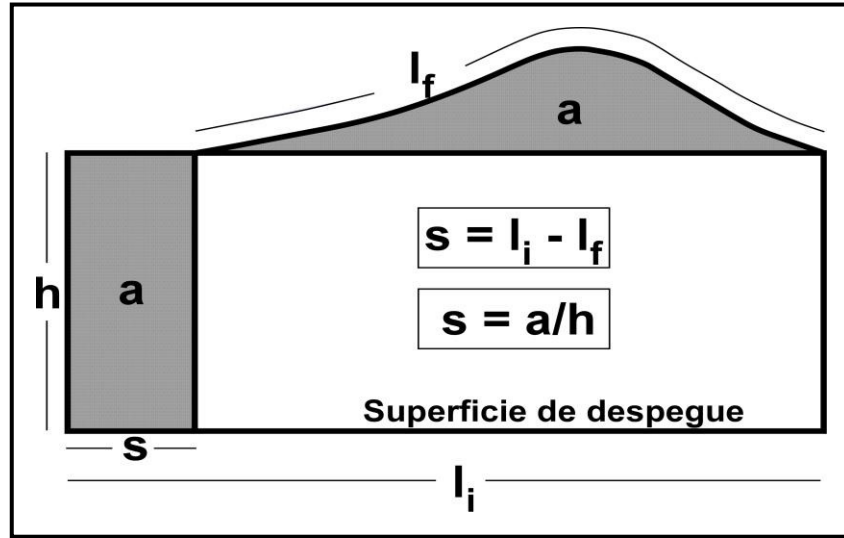


Fig. 80. Esquema del método de balance de áreas.

• METODO DE SUPPE

El método elaborado por Suppe (1983, 1985, 1986) para balancear perfiles se basa en la geometría interna de un cabalgamiento con diseño de rampa y plano. Para analizar las relaciones angulares de la estructura, se asumen estructuras tipo "kink". (Cristallini, 1998)

Los supuestos del método son los siguientes:

- Los cabalgamientos tienen una geometría de rampa - plano ideal (y las fallas no son lítricas).
- No hay un cambio en el espesor de los estratos durante la deformación.
- No hay cizalla en los bancos horizontales.
- Se conserva la longitud de líneas estratales.

4.4.2.2. Sección Balanceada Regional: Proyecto Altiplano Peruano

La construcción de la sección balanceada regional de este proyecto, toma como base la sección estructural previamente realizada (Fig. 81) la cual tiene una longitud de 96.600 km con una dirección SW - NE.

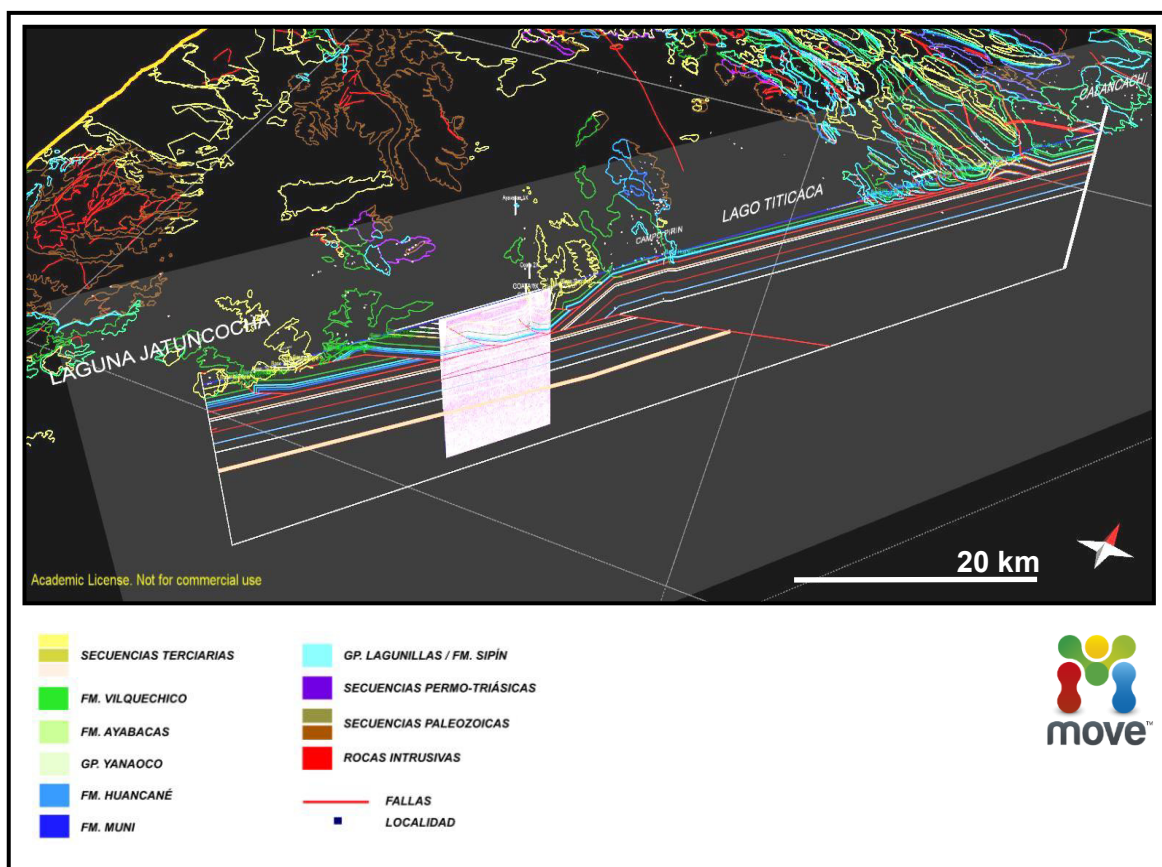


Fig. 81. Ubicación y extensión del corte estructural realizado.

La sección balanceada dentro de su estructura, retrodeformada al tope de la Formación Huancané, presenta dos dominios tectónicos asociados a distintos agentes de deformación y transferencia de energía.

Hacia el borde occidental apreciamos que el encargado de generar las estructuras en subsuelo y superficie; guardan relación intrínseca con la reptación del basamento que funciona como una cuña intercutable, explicando así la morfología de la Estructura Pirin, yacimiento petrolífero del Altiplano, como también transfiriendo la energía a un despegue asociado a secuencias paleozoicas superiores, generando los pliegues asociados a la flexión y propagación de falla al oeste del área, los cuales pueden ser observados levemente en la sísmica, específicamente en la estructura que atraviesa el pozo Coata 1X (Fig. 82). Es importante señalar que se puede distinguir importantes depocentros neógenos, cuyo soterramiento guarda estrecha relación con la madurez termal y generación de hidrocarburos, siendo el de mayor espesor terciario el ubicado entre el flanco oeste de la estructura Coata, con el flanco este de la estructura contigua.

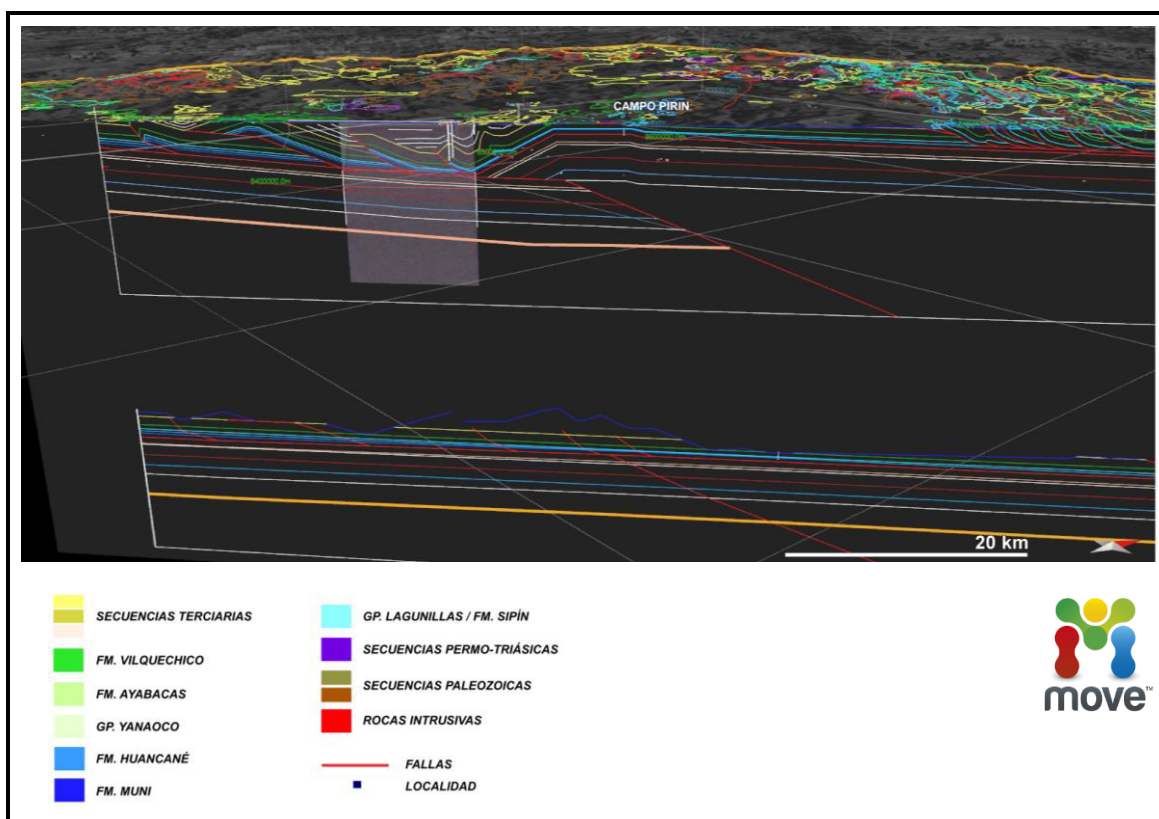


Fig. 82. Esquema del corte balanceado construido en el sector occidental.

Con referencia al borde oriental del área de estudio, el trabajo para poder delimitar las estructuras en subsuelo que dieron origen a la morfología actual de la cuenca, tuvo gran complejidad debido a la nula información sísmica que cubre esta área. Sin embargo, se pudo generar un modelo estructural, siguiendo los parámetros teóricos de construcción de secciones balanceadas apoyados, claro está, en la data de superficie así como información indirecta de profundidad.

Para este sector, se presenta el modelo de deformación asociado a un *antiformal stack*, modelo de dúplex cuya característica principal es el gran desplazamiento de las rampas individuales generando que el cabalgamiento entre las estructuras se dé una en el tope de la otra, el cual está conformado de niveles paleozoicos inferiores que transfieren el esfuerzo a secuencias pelíticas jurásicas, Formación Muni, que dan lugar a las estructuras tipo imbricaciones que apreciamos en la Faja Plegada del Altiplano, restringiendo así el mayor acortamiento a esta área (Fig. 83).

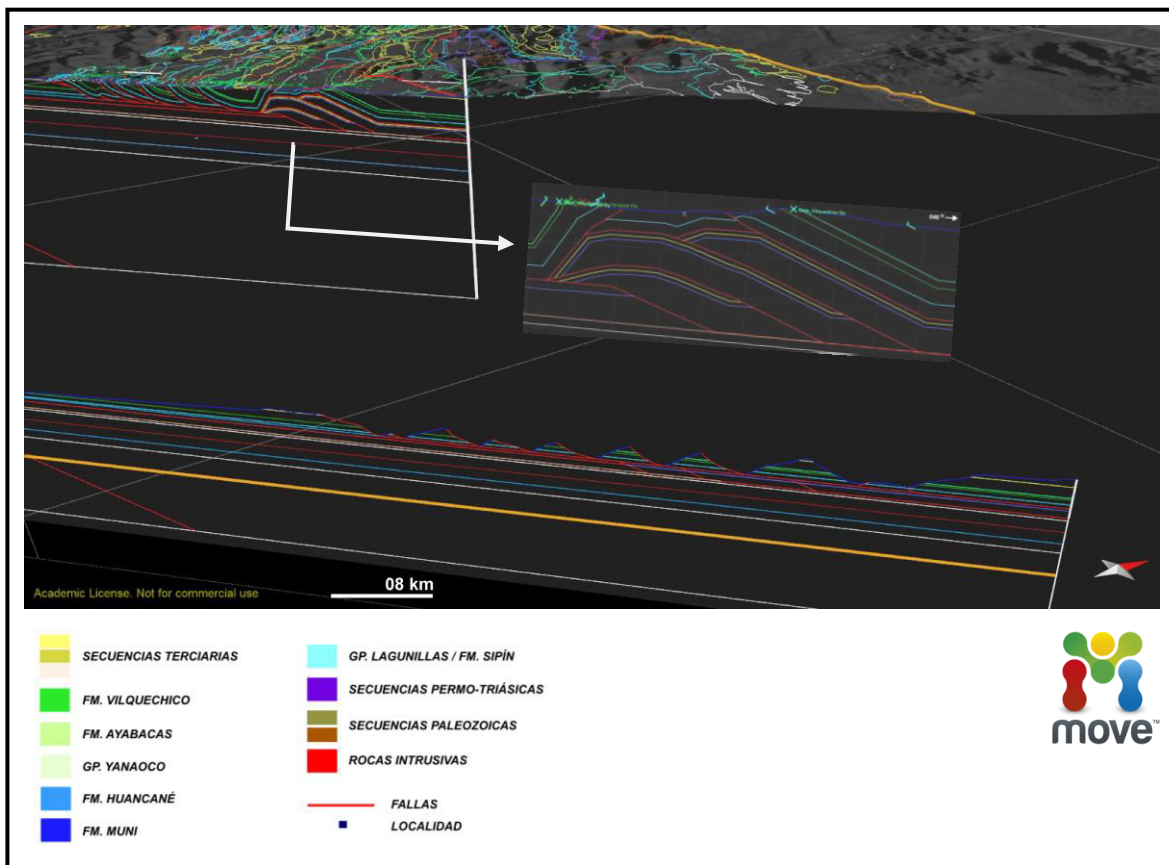


Fig. 83. Esquema del corte balanceado construido en el sector oriental. Nótese que las estructuras tipo duplex (ampliadas) son las responsables del acortamiento en la faja plegada del Altiplano.

A su vez, es necesario mencionar que se pudo determinar la profundidad del despegue jurásico (Fig. 84), así como de sus niveles superiores e inducir los inferiores a partir del análisis del sinclinal de Vilquechico reconstituido a partir de los datos estructurales y controles litológicos de superficie. Es importante mencionar también que el cese de la deformación puede ser atribuido al esfuerzo del *back-hinterland* asociado a la estructura de Pirin, así como la disminución progresiva del espesor con dirección al lago.

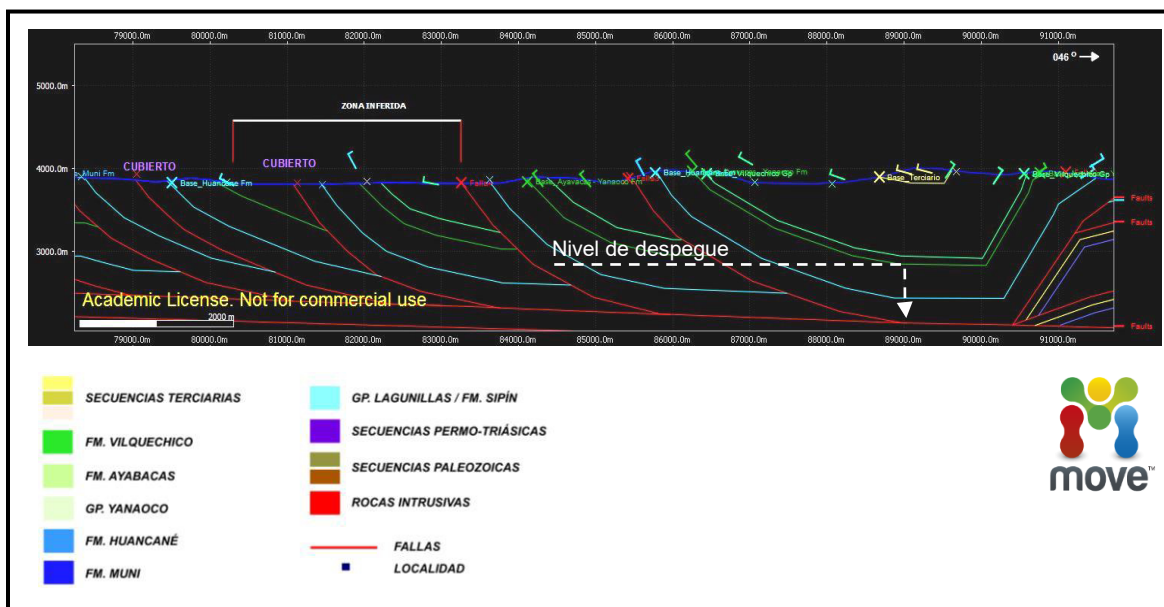


Fig. 84. Imagen mostrando la profundidad del despegue jurásico para el borde occidental del sector, a partir de la información de superficie.

Integrando ambos sectores del estudio, pudimos aclarar y generar la sección balanceada del Altiplano Peruano (Fig. 85), la cual nos permite entender a detalle las características estructurales, así como apreciar las variaciones laterales a las cuales está sometido la secuencia sedimentaria; es válido concluir que podemos confirmar nuestras interpretaciones estratigráficas, en el sentido que los niveles Pérmico Superiores - Triásicos propuestos en nuestro análisis del pozo RH-1, pueden ser correlacionables lateralmente, siendo importante aclarar que no afloran hacia los bordes de este perfil debido a que los niveles de despegue, para el caso del lado occidental no aflora a superficie; mientras que para el lado oriental es de edad jurásica, por ende, las secuencias inferiores a ella se encuentran cubiertas en profundidad. Así como entender la distribución de las unidades jurásicas calcáreas, Grupo Lagunillas / Formación Sipín, las cuales al contextualizarse en un período de post-rift, quedan restringidas hacia las inmediaciones del Lago Titicaca, pero no extendiéndose mucho más al este, puesto que el dominio del episodio del Rift Triásico, queda conformado hacia el borde occidental de la cuenca, no apreciable en esta sección. Por otro lado, en base al análisis mostrados a partir de los análisis de restitución, obtuvimos un acortamiento del 30.6 %, equivalente a 42.650 km; tomando como referencia que la sección restaurada presenta una longitud de 136.250 km.

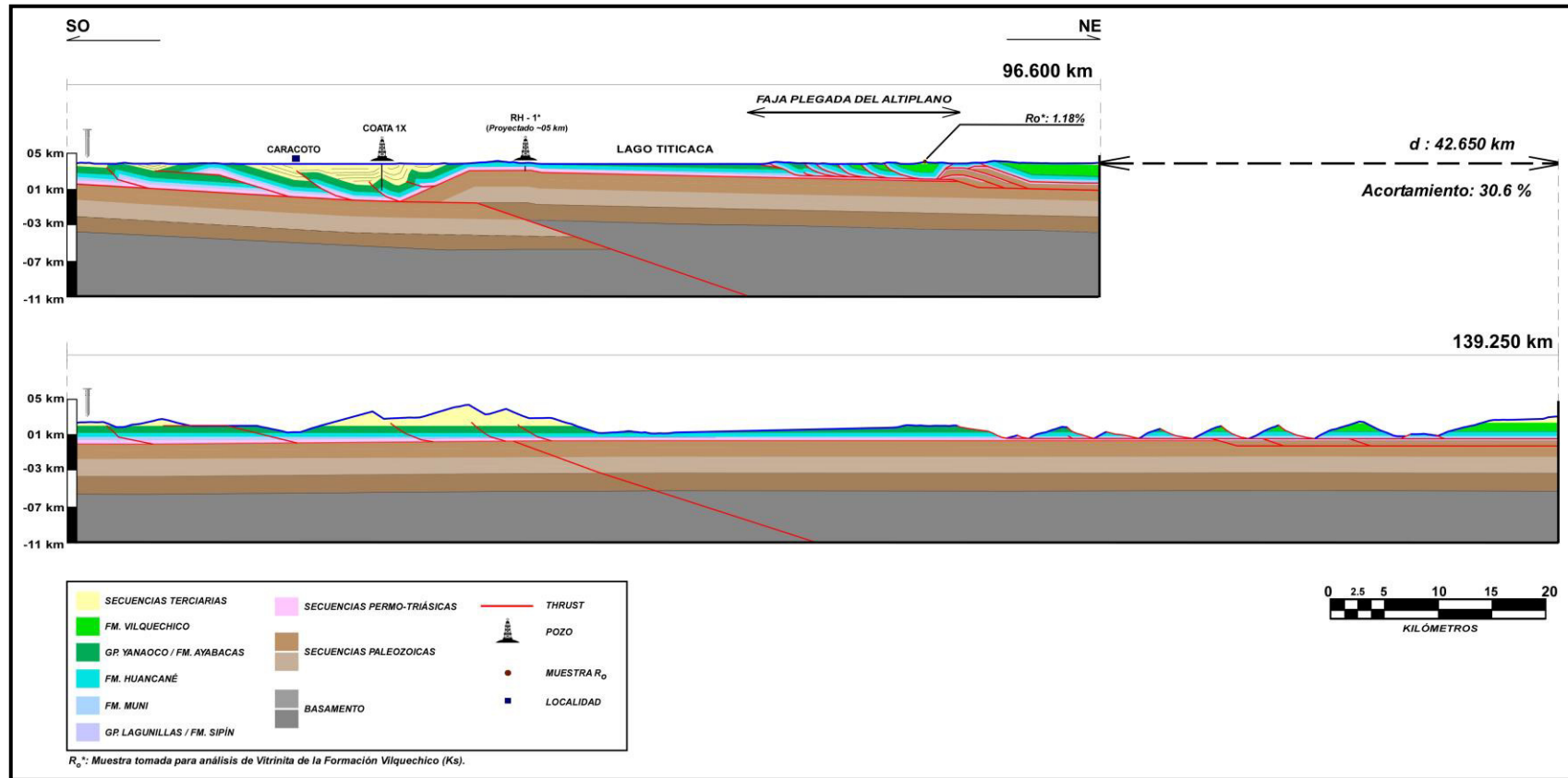


Fig. 85. Sección balanceada regional desarrollada en el presente trabajo.

• DISCUSION DEL CORTE BALANCEADO.

Es importante señalar que el modelo presentado para el sector occidental del proyecto, es una símil de los ya aprobados en otras partes de Sudamérica, tomando como ejemplo a Espurt et al. (2008) que construye una sección balanceada entre la Cordillera Oriental y la Cuenca Ucayali (A), en la que ejemplifica un modelo de transferencia de energía de basamento a pila sedimentaria, para el caso del *thrust* del Shira que transmite el esfuerzo al *thrust* de San Martín, generando dicha estructura (B).

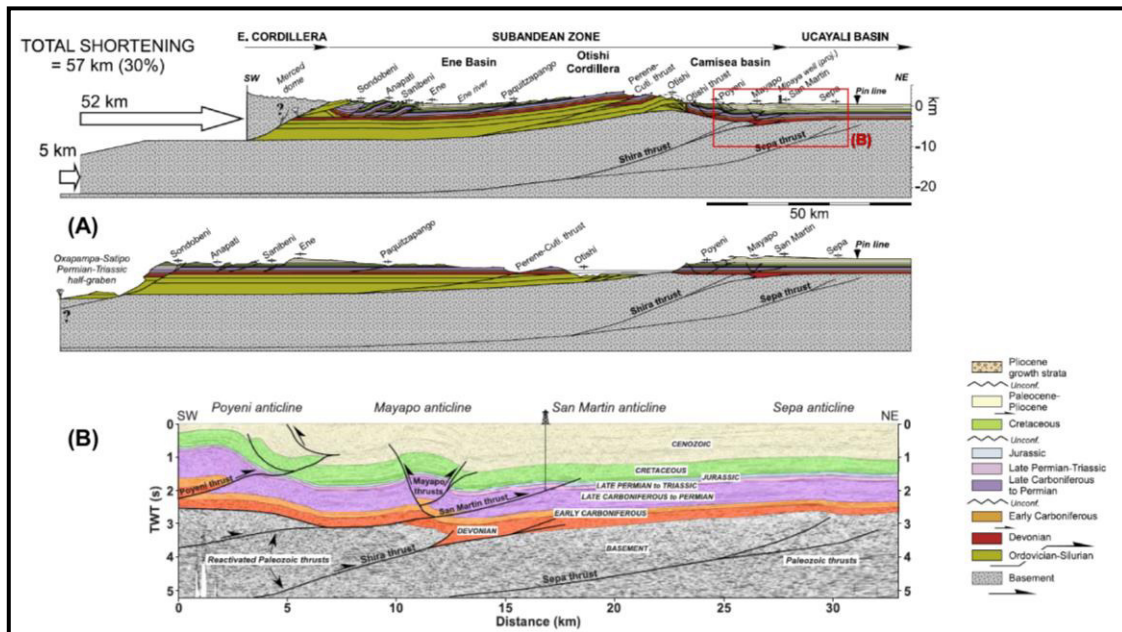


Fig. 86. (A) Modelo de sección balanceada desarrollada por Espurt et al. (2008). (B) Interpretación sísmica en la que se distingue la transferencia de energía de basamento (Shira thrust) a pila sedimentaria (San Martín thrust).

Hacia el borde oriental, los modelos asociados a una deformación proveniente de un tipo de duplex, *antiformal stack*, han sido estudiados a detalle, y pueden ser corroborados a partir de modelos ya comprobados con una similar configuración estructural en otras partes del mundo. Para el caso, tomaremos nuevamente a Espurt et al. (2011), puesto que desarrolla un modelo de sección balanceada para el área de Camisea, en la que argumenta la estructuración de los pliegues frontales al *antiformal stack*, el cual transfiere dicha energía a despegue superiores. (Fig. 87)

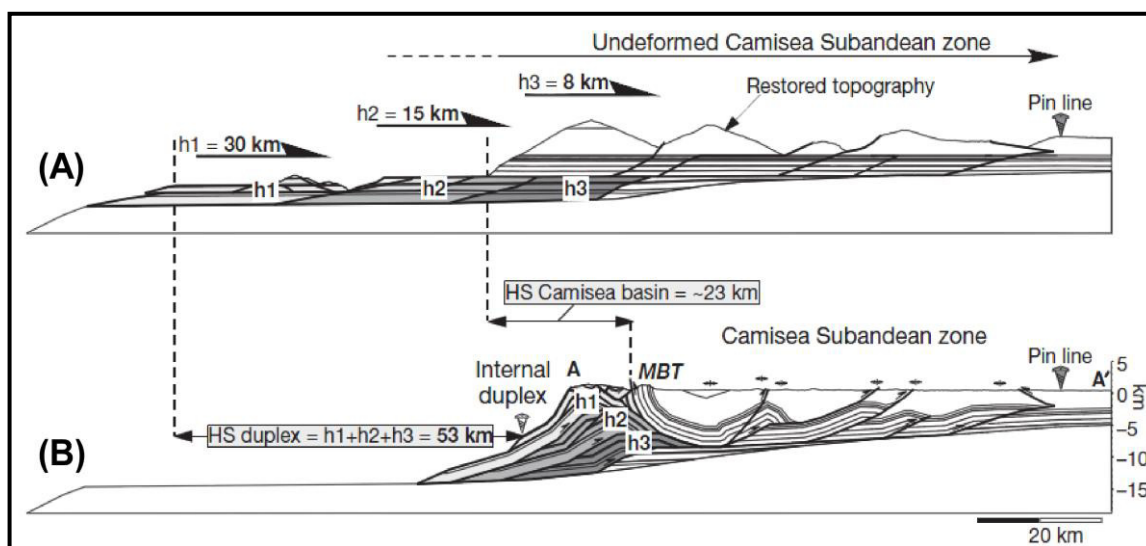


Fig. 87. (A) y (B) Sección balanceada desarrollada por Espurt et al. 2011, en el área de Camisea. Nótese en la figura (B) los duplex asociados al acortamiento del frente de la zona de Camisea.

En base a estas evidencias, consideramos el corte presentado, como un modelo coherente validado que pueda servir de base para poder entender la generación de estructuras desarrolladas en el sector, así como evaluar probables zonas prospectivas con enfoque energético.

CAPÍTULO V. SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TITICACA

5.1. GENERALIDADES	109
5.1.1. El Sistema Petrolero	110
5.2. SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TITICACA.....	112
5.2.1. Sistema Petrolero del Borde Occidental.....	114
5.2.2. Sistema Petrolero del Borde Oriental	124
5.3. NUEVOS PLAYS DE EXPLORACION	129

CAPÍTULO V. SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TITICACA

5.1. GENERALIDADES

El Altiplano es una cuenca inter-montañosa compleja estructurada por tectónica de corrimiento (Rochat et al., 1998; Rochat, 2002), con un potencial petrolífero probado como lo mostró la producción del campo Pirin (37.7 °API) en el borde septentrional del Lago Titicaca. Este campo acumuló cerca de 300 000 barriles de petróleo de excelente calidad desarrollados a partir de reservorios con una profundidad no mayor a 150 m, antes del abandono de los pozos (Fig. 88). Aunque alguno de los cuales, continuaron produciendo mínimas cantidades de petróleo hasta antes del 2008, confirmando la filiación petrolífera de la cuenca del Titicaca.

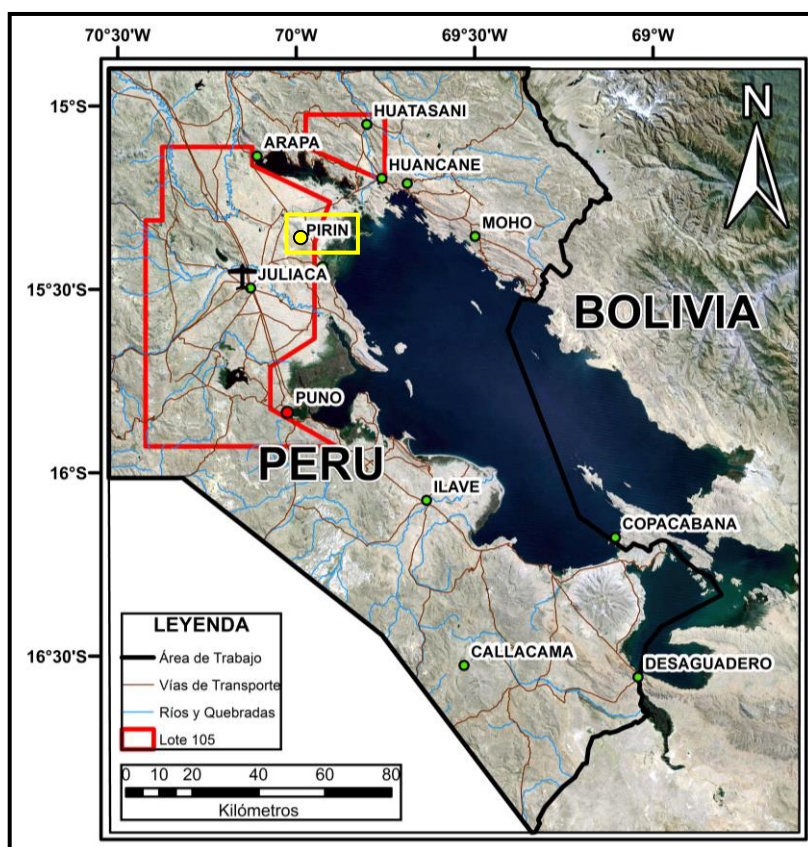


Fig. 88. Ubicación geográfica del Yacimiento Pirin.

5.1.1. El Sistema Petrolero

Es un sistema natural que comprende un volumen de roca fuente madura de hidrocarburos así como todo el petróleo y gas generado de dicha roca y que está presente en acumulaciones comerciales y no comerciales. Un sistema petrolífero incluye todos los elementos y procesos geológicos que son esenciales para que un depósito de crudo y gas exista (Magoon y Dow, 1994). Las siguientes definiciones de términos relacionados con el concepto de sistema petrolífero han sido tomadas de Magoon y Dow (1994). El término sistema se refiere a los elementos interdependientes y procesos que forman la unidad funcional que crea la acumulación de hidrocarburos.

5.1.1.1. Elementos que forman un sistema petrolero

- a) **Roca madre**, aquella que está generando o ha generado y expulsado petróleo. La roca fuente necesita haber estado sometida a un calentamiento durante un lapso de tiempo geológico para alcanzar madurez termal para generar hidrocarburos.
- b) **Roca reservorio**, aquella que almacena el petróleo. El petróleo es almacenado en los poros de esta roca.
- c) **Roca sello**, aquella que impide que el petróleo se escape de las trampas donde se ha acumulado. Las trampas son los sitios donde existe una disposición geométrica convexa de la roca almacenadora y de la roca sello que favorece la acumulación del petróleo e impide que este escape hacia arriba o hacia los lados.
- d) **Roca de sobrecarga**, aquella que cubre a la roca fuente y causa su enterramiento a una profundidad tal que se den las condiciones de temperatura necesarias para que se genere petróleo a partir de la materia orgánica contenida en la roca fuente.

5.1.1.2. Procesos de un sistema petrolero

- a) **Formación de las trampas**, incluye todos los procesos que producen la disposición geométrica favorable para que el petróleo quede acumulado y atrapado en ellas. Estos procesos son deformación de las rocas en el caso de trampas estructurales y procesos sedimentarios y diagenéticos en el caso de trampas estratigráficas.
- b) **Generación de hidrocarburos**, proceso mediante el cual la materia orgánica contenida en la roca fuente es convertida en hidrocarburos por la acción del aumento de temperatura y del tiempo.
- c) **Migración de los hidrocarburos**, procesos de movimiento o flujo de los hidrocarburos desde la roca fuente donde son originados hasta la trampa donde son acumulados.

- d) **Acumulación de hidrocarburos en las trampas**, resultado de la migración de hidrocarburos hacia las zonas geométricas favorables, trampas.

Un sistema petrolífero existe donde se sabe que ocurren todos estos elementos y procesos esenciales o donde se piensa que hay buenas posibilidades de que ocurran (Fig. 89)

Formalmente, el nombre de un sistema petrolero está compuesto por el nombre de la roca generadora activa, seguida de un guión y el nombre de la roca reservorio que contiene volúmenes más grandes de petróleo provenientes de la roca generadora. El nombre termina con un símbolo de puntuación, que expresa el nivel de certidumbre - conocido, hipotético o especulativo- acerca de una lentilla de roca generadora activa haya generado los hidrocarburos en una acumulación. El signo (!) indica que se trata de un sistema petrolero conocido. En un sistema petrolero hipotético, designado con el símbolo (.), la roca generadora ha sido caracterizada mediante el análisis geoquímico, pero aún no se ha efectuado ningún ajuste con una acumulación de hidrocarburos. En un sistema petrolero especulativo, designado con el símbolo (?), la correlación entre una roca generadora y el petróleo se postula meramente en base a la inferencia geológica. (Schlurmberger, 2009)

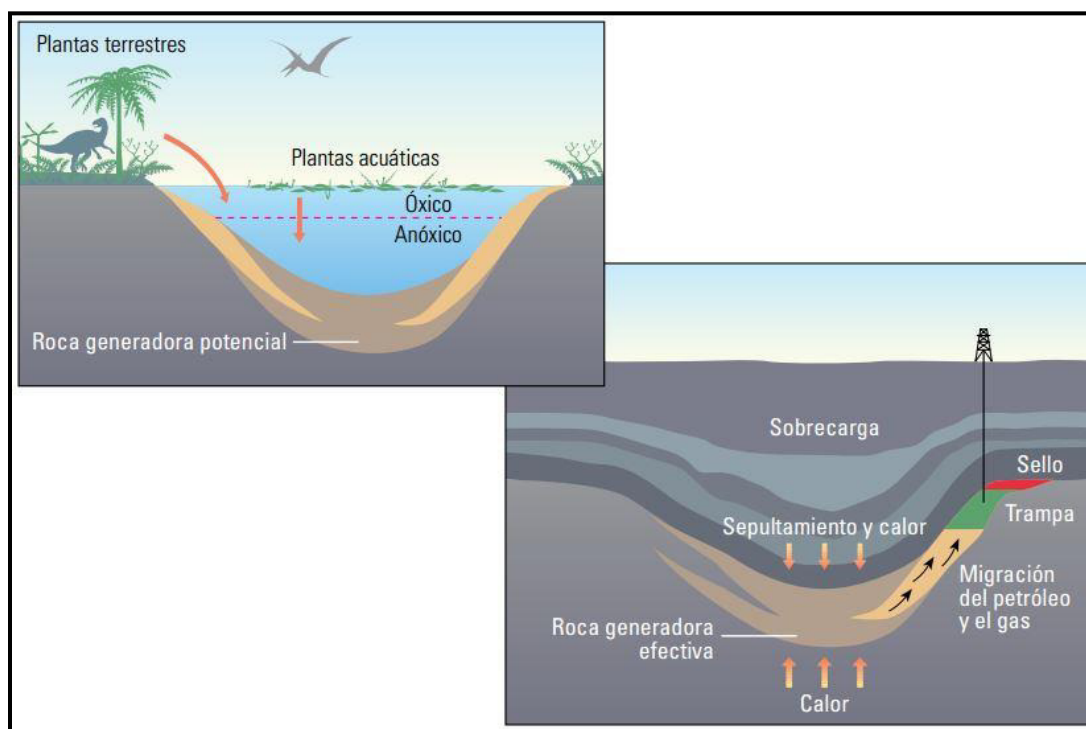


Fig. 89. Simulación de los procesos geológicos, térmicos y de flujo de fluido en las cuencas sedimentarias a través del tiempo. El modelado de cuencas y sistemas petroleros reconstruye la depositación de las rocas generadoras, reservorio, sello y rocas de sobrecarga, y los procesos de formación de trampas y generación, migración y acumulación de hidrocarburos desde el pasado (izquierda) hasta el presente (derecha) (Schlurmberger, 2009).

5.2. SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TITICACA

La cuenca inter-montañosa del Altiplano, reúne los elementos y procesos necesarios para poder argumentar la existencia de un sistema petrolero en esta área (Fig. 90). Los elementos y procesos para la generación de hidrocarburo, varían desde el Paleozoico a Cenozoico; sin embargo a la fecha no existe un análisis a detalle enfocado en definir con exactitud cada uno de estos; motivo por el cual en el presente trabajo se expone distintos sistemas petroleros tanto hipotéticos (.) como especulativos (?) con la finalidad de generar un sólido producto que pueda cooperar con el entendimiento de tan compleja zona.

Para una mejor comprensión, se ha dividido el apartado en función al análisis estructural y estratigráfico realizado en capítulos anteriores, motivo por el cual se presentan dos áreas de interés hidrocarburífero tanto al lado occidental como oriental del Lago Titicaca.

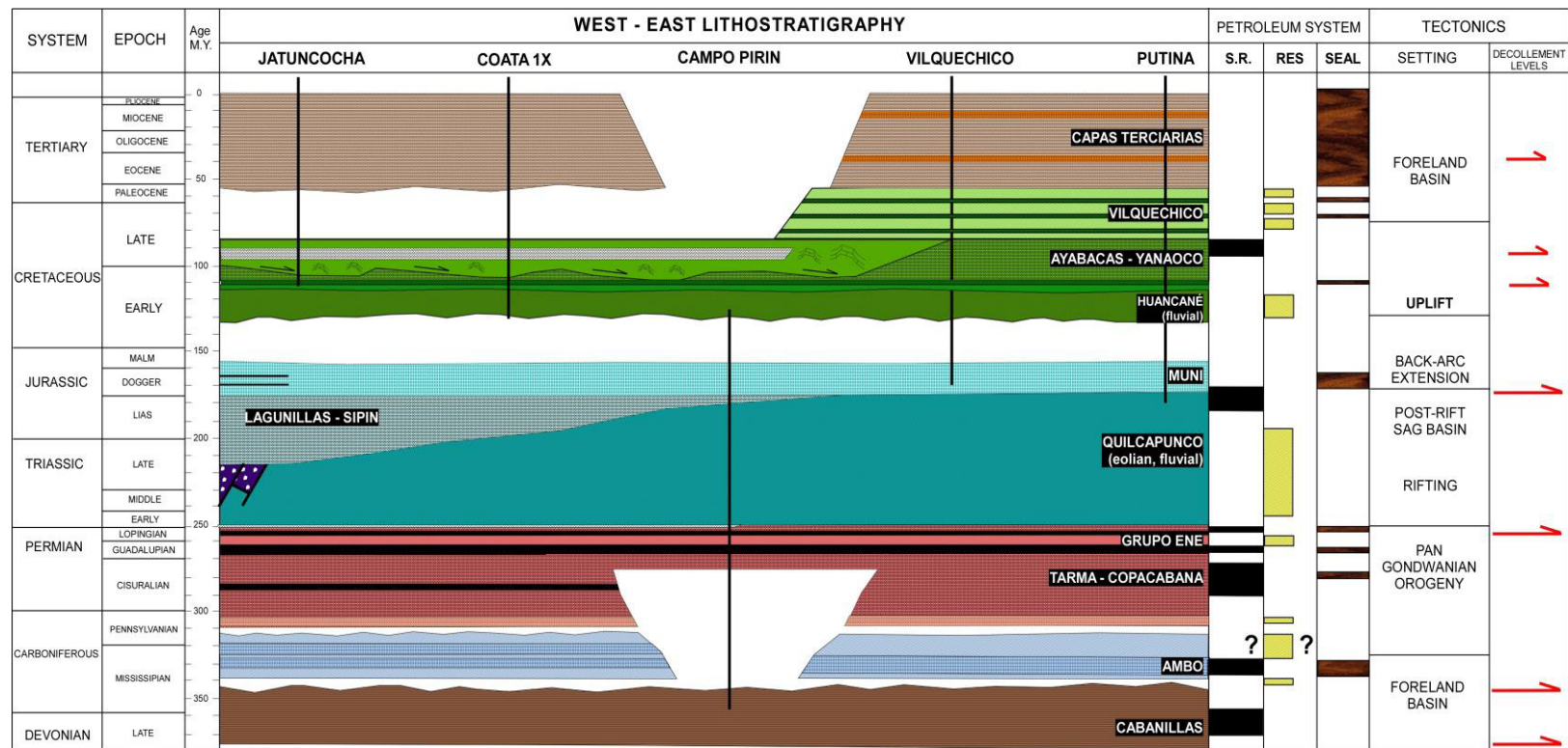


Fig. 90. Diagrama estratigráfico de las secuencias sedimentarias mostrando la relación con el sistema petrolero de la cuenca altiplánica peruana.

5.2.1. Sistema Petrolero del Borde Occidental

5.2.1.1. Roca Generadora

Las rocas generadoras que se presentan en esta parte de la cuenca, bajo nuestra interpretación, se encuentran en el Paleozoico y Mesozoico, quedando mejor definidas en el Grupo Cabanillas, Grupo Ene –en discusión- (Formación Ene-Shale? / Shinai) y la Formación Ayabacas respectivamente.

Para el caso del Grupo Cabanillas, los análisis realizados por Infologic (2006), nos muestran que presentan un valor máximo de TOC superior al 3 %, en base a los registros previos (Fig. 91), mientras que, a partir de los estudios realizados en el presente trabajo en unidades equivalentes de dicho grupo en la frontera peruana - boliviana, los valores de Ro, se encuentran entre los 0.95 - 1.20 %.

En base al ambiente de sedimentación y apoyados también en los estudios de Infologic (2006), el kerógeno relacionado con el Grupo Cabanillas es de tipo III y se estima un espesor superior a los 3000 m (Yukos 2003, Este trabajo).

Con referencia al Grupo Tarma-Copacabana, los informes previos señalan que presenta un valor máximo de TOC superior al 1.8 %, registrado en distintos afloramientos (Fig. 91) (Infologic, 2006), sin embargo los análisis a dicha secuencia en este trabajo arrojan valores de TOC inferiores al 0.30%, sumado a esto, la poca profundización de los estudios a la unidad y al no haber sido reconocida en afloramiento, descartamos inicialmente considerarla como roca generadora a expensas de trabajos posteriores que ameriten su designación.

El Grupo Ene, en cuya distribución, contempla los niveles de lutitas y calizas negras de las formaciones Ene-Shale y Shinai, es considerado bajo nuestra interpretación como una importante roca madre para este sector de la cuenca, sumado a esto, ser ya conocida como una secuencia prolífica en generación de hidrocarburos a lo largo de las cuencas subandinas.

El escollo principal para poder realizar mayores análisis, es que el Grupo Ene no se encuentra aflorando en el área de estudio, sin embargo, si es interpretado en profundidad (Análisis del Pozo RH-1) con un espesor de 280 m, así como correlacionable con la formación Chutani la cual aflora en la frontera Peruana - Boliviana; un dato interesante que se extrae a partir del informe de Infologic (2006), es que el crudo de Pirin es el resultado de la generación de hidrocarburos de una roca madre paleozoica o precretácica, restringiéndolo para niveles jurásicas a partir de la abundancia de *triaromatic dinosteranes*, sin embargo dicho biomarcador es posible encontrarlo en niveles pérmicos superiores (Knoll et al. 2007; CoreLab, 1999; Geomark Research, 1996) asociado a un ambiente restringido con poca influencia marina tal y como señala el informe de Infologic, sustentando así la posibilidad de evaluar la presencia de hidrocarburos en la cuenca altiplánica a partir de dichas secuencias.

En base a los análisis de TOC y Ro a los niveles pérmicos superiores, muestran la posibilidad de encontrarnos en una evidente ventana de generación de hidrocarburos para el borde occidental del proyecto, tomando como evidencia los datos de Ro: 0.85 - 0.90 % y TOC superior al 1.04 %, así como asociado a un kerógeno tipo III, la constituyen en una potencial roca generadora para el sector.

Con referencia a las unidades mesozoicas, la Formación Sipín (equivalente lateral del Grupo Lagunillas) caracterizada por presentar principalmente secuencias calcáreas, ha sido indicada en diferentes trabajos como la unidad relacionada con la generación de hidrocarburos del área de Pirin (Infologic, 2006; Hermoza, 2007; Pan Andean Resources PLC, 2010), sin embargo por las descripciones previamente expuestas desestimamos tal interpretación. Aunque es necesario indicar que hacia el borde occidental, donde se expone con mayor magnitud el Grupo Lagunillas, se evidencia horizontes de posible producción o generación hidrocarburífera registrados en los reportes de campo desarrollados por el IRD – PERUPETRO entre los años 2006 y 2007.

La Formación Ayabacas, ampliamente distribuida en el área de estudios, presenta valores de TOC, en su equivalente lateral de la zona Boliviana (este trabajo), de 1.20 % en promedio, y de reflectancia de vitrinita entre 1.74 y 3.77 %, constituyéndola una potencial roca generadora para este sector de la cuenca. El kerógeno asociado a esta unidad es de tipo I, II y III encontrándose en ventana de generación de petróleo según los análisis de Yukos (2003).



Fig. 91. Ubicación de los afloramientos y pozos, de donde se extrajeron las muestras para los análisis geoquímicos (Infologic, 2006).

5.2.1.2. Roca Reservorio

Las rocas reservorios interpretadas para esta parte de la cuenca, lo constituyen los niveles fluvio-eólicos del Grupo Ene y de la formación Quilcapunco, así como los reservorios cretácicos tanto de las secuencias continentales de la Formación Huancané, como también de las calizas fracturadas con porosidad secundaria de la Formación Ayabacas.

Hacia la zona de Pirin, en el pozo RH-1, se registran dos intervalos de areniscas eólicas y fluviales prospectivas para el almacenamiento de hidrocarburos. La primera secuencia con un espesor de 150 m, presenta *shows* de gas y son interpretados como uno de los intervalos productores del área de Pirin, de edad pérmica superior. La segunda unidad, la formación Quilcapunco, también son areniscas con un espesor de 60 m, las cuales muestran *shows* de petróleo y son correlacionables con la formación Lower Nia, productora también en los ya conocidos campos de Camisea y Candamo. Bajo nuestra interpretación, y apoyados previamente en la generación pérmica de los hidrocarburos en el Titicaca, consideramos que estas unidades fueron las encargadas de producir los 300 000 barriles de crudo ligero en el área. Es necesario indicar también que dichos intervalos se encuentran en subsuelo a lo largo de la cuenca, sin embargo son correlacionables en afloramientos con las secuencias datadas previamente mostradas en el estrecho de Tiquina.

A su vez, en base a la información del pozo Coata 1X, así como el reconocimiento en afloramiento, las secuencias con facies eólicas y fluviales de la formación Huancané puede considerarse como una potencial roca reservorio, así mismo las secuencias carbonatadas cretácicas de la formación Ayabacas presentan dentro de su secuencia niveles brechosos calcáreos así como slumps muy fracturados, los cuales favorecen la posibilidad de almacenamiento de hidrocarburo en esta unidad. Sumado a esto, la presencia de niveles calcáreos oolíticos, reservorio comprobado en el medio oriente así como en el Golfo de México, en el pozo Coata 1X y la presencia de *shows* en su distribución (Fig. 92) corroboran que podemos encontrarnos en una excelente roca que pueda albergar crudo o gas para este sector de la cuenca.

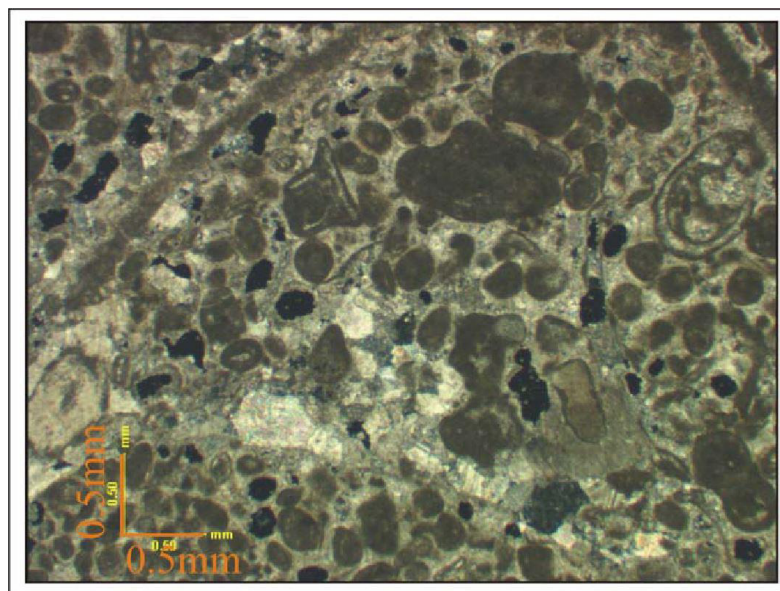


Fig. 92. Sección delgada mostrando posibles reservorios carbonatados oolíticos de la Formación Ayabacas en el pozo Coata 1X (MD: 1894-1898) (Yukos, 2003)

5.2.1.3. Roca Sello

Para el borde occidental, los niveles pelíticos que se encuentran al tope de las secuencias pérmicas del Grupo Ene, así como de la formación Quilcapunco, constituyen los principales sellos para las secuencias de areniscas fluvio-eólicas para esta área de estudio.

En el caso de los reservorios cretácicos, se presentan en el área de trabajo, importantes niveles de anhidrita, reconocidos tanto en campo como en afloramiento, así como secuencias finas paleógenas que podrían constituir importantes sellos para estas unidades.

5.2.1.4. Generación, Migración, Entrampamiento y Análisis del Sistema Petrolero

En función a las interpretaciones previas, podemos postular para el borde occidental de la cuenca, tres sistemas petroleros hipotéticos para poder explicar la acumulación de petróleo y/o gas para el sector.

Podríamos mencionar al sistema petrolero Cabanillas - Ene / Quilcapunco (.), Ene - Ene / Quilcapunco (.) así como al de Ayabacas-Ayabacas (.), los cuales pueden ser considerados como los responsables de la generación de hidrocarburos para esta área de estudio, sin embargo basados en el escaso análisis geoquímico a detalle, es complejo generar una delimitación de las áreas de influencia de cada uno.

Para el desarrollo de este trabajo, se realizó el modelado del sistema petrolero en el software Petromod 1D de Schlumberger, en el sinclinal contiguo al pozo Coata 1X (Fig. 93), interpretado en sísmica; puesto que consideramos que a partir de la mayor carga sedimentaria así como distintas variables identificables en éste, es posible generar una idea del potencial de generación que pudieron tener las rocas para este sector.

A partir de esto, nos fue posible obtener un diagrama de soterramiento adecuado, en este caso contrastado con la temperatura (Fig. 94), y en base a la información bibliográfica de datos de TOC así como los análisis del actual proyecto, pudimos realizar modelos de generación y expulsión para la evaluación del sistema petrolero en esta zona de trabajo. (Fig. 95 y Fig. 96)

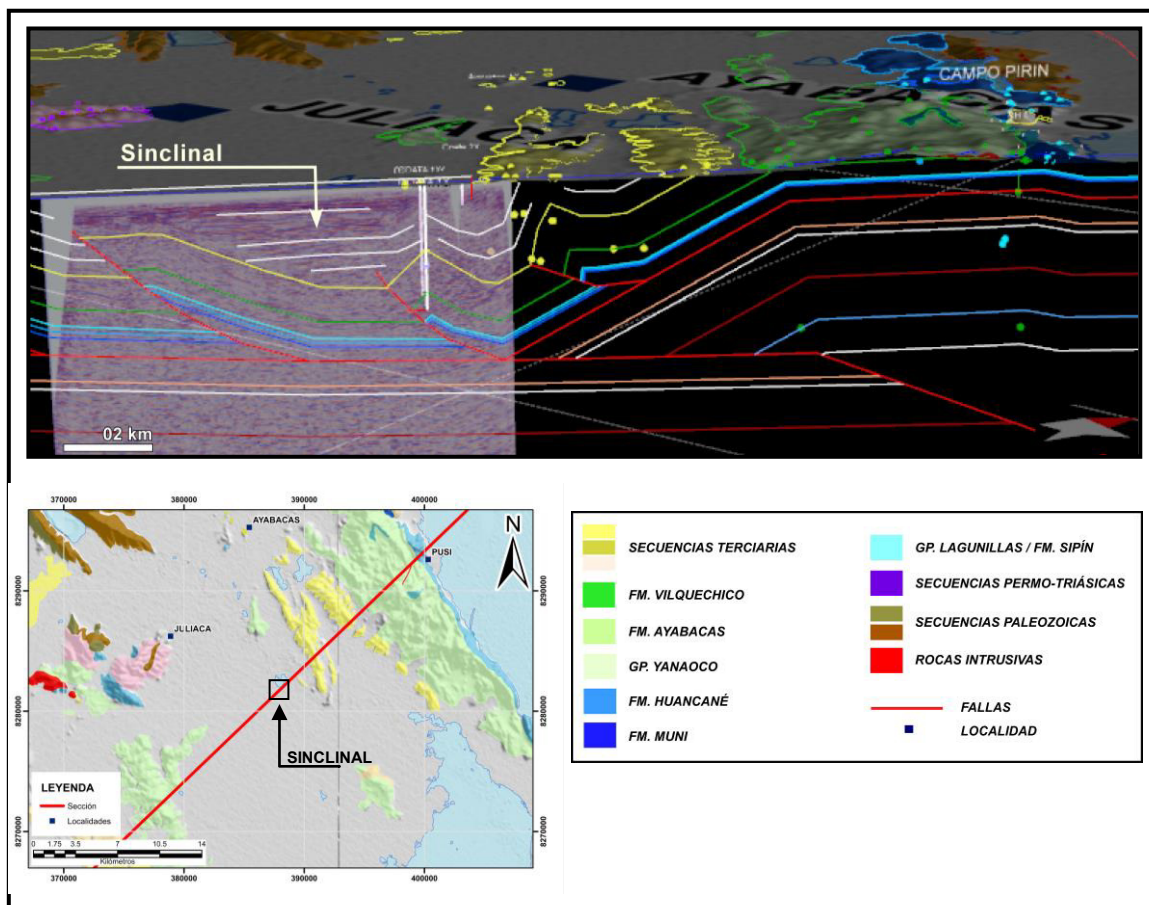


Fig. 93. Ubicación del sinclinal utilizado para la modelización geoquímica en el borde occidental del proyecto.

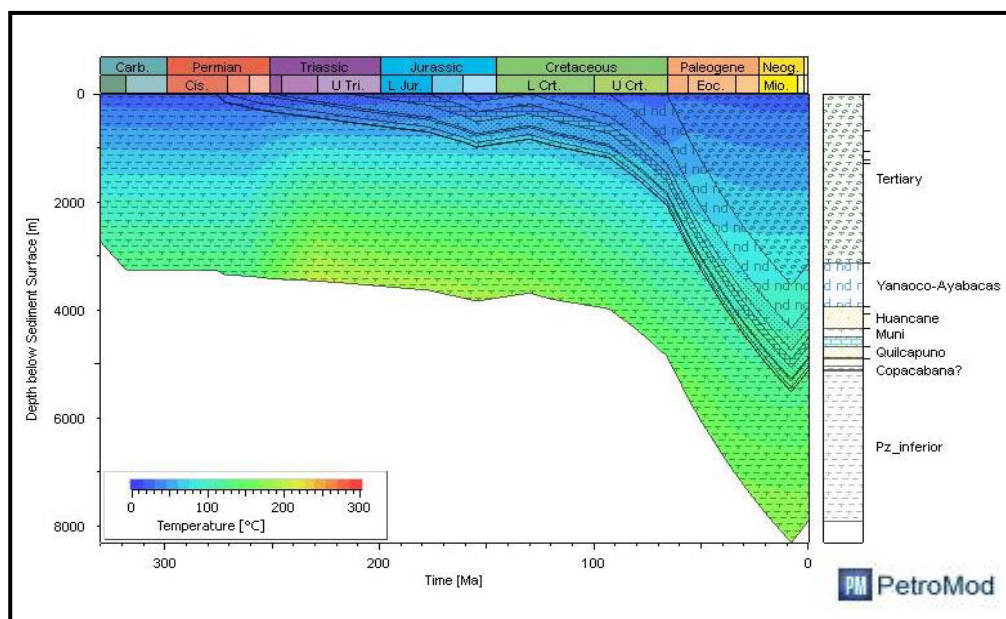


Fig. 94. Diagrama de soterramiento contrastado con los valores de temperatura para las formaciones designadas.

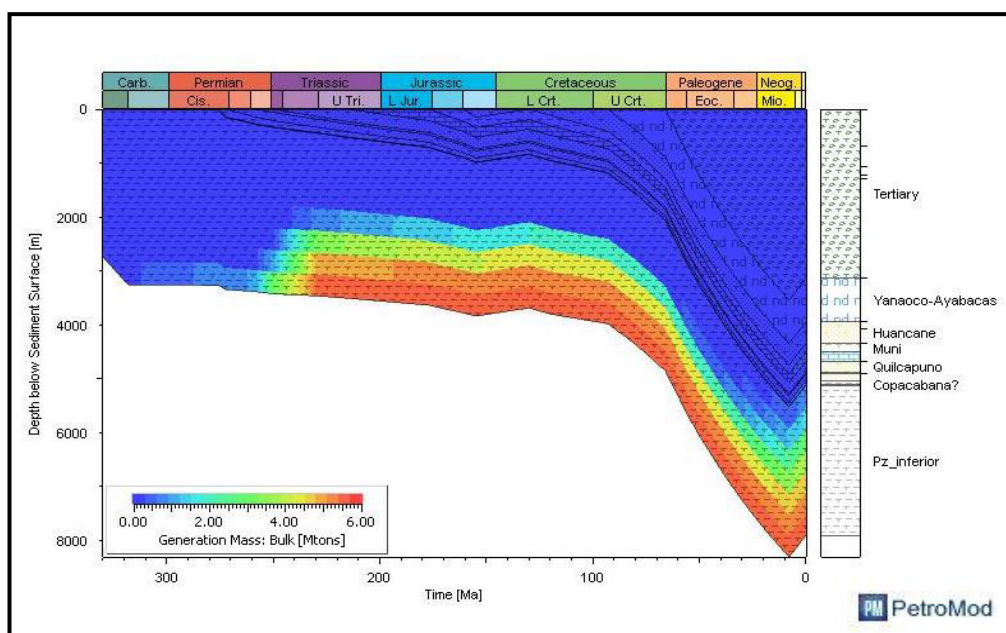


Fig. 95. Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de generación de hidrocarburos para las formaciones designadas.

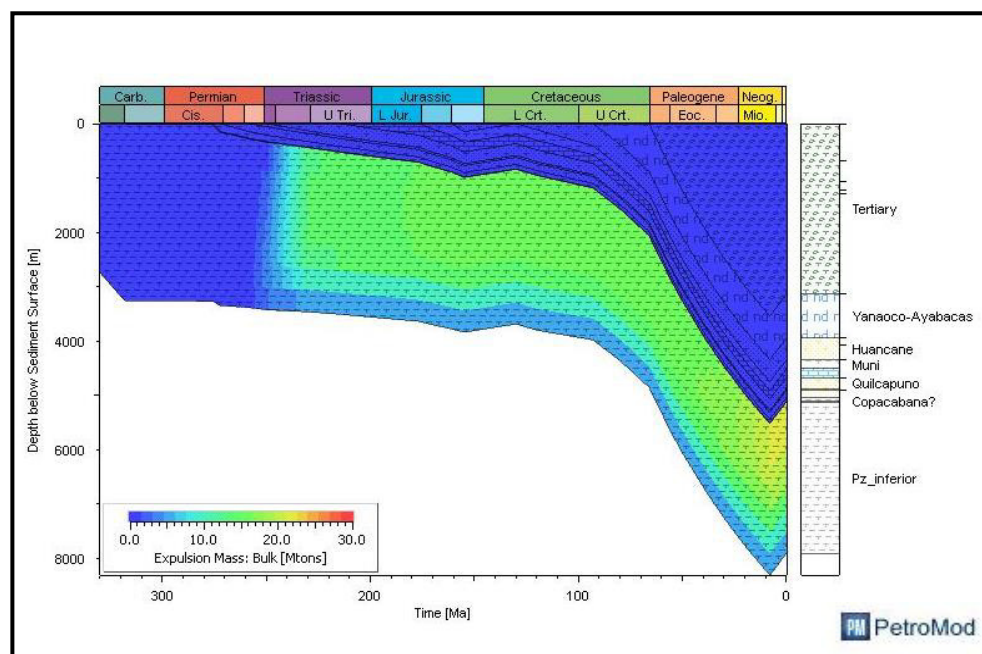


Fig. 96. Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de expulsión de hidrocarburos para las formaciones designadas.

En base a las figuras 95 y 96, se ha podido reconocer el gran potencial de las unidades paleozoicas inferiores, el Grupo Cabanillas para el caso, puesto que como es sabido dicha secuencia está involucrada de manera análoga con la generación de gas en las cuencas subandinas, sin embargo no es posible distinguir claramente si existe un potencial generador y una posible expulsión de los niveles pelíticos de la formación Ene, Grupo Lagunillas / Fm. Sipín, así como para los niveles calcáreos de Ayabacas, por tal motivo, expresamos nuevamente ambos diagramas, pero desestimando el potencial del Paleozoico inferior para poder identificar con mayor claridad tal argumento (Fig. 97 y Fig. 98).

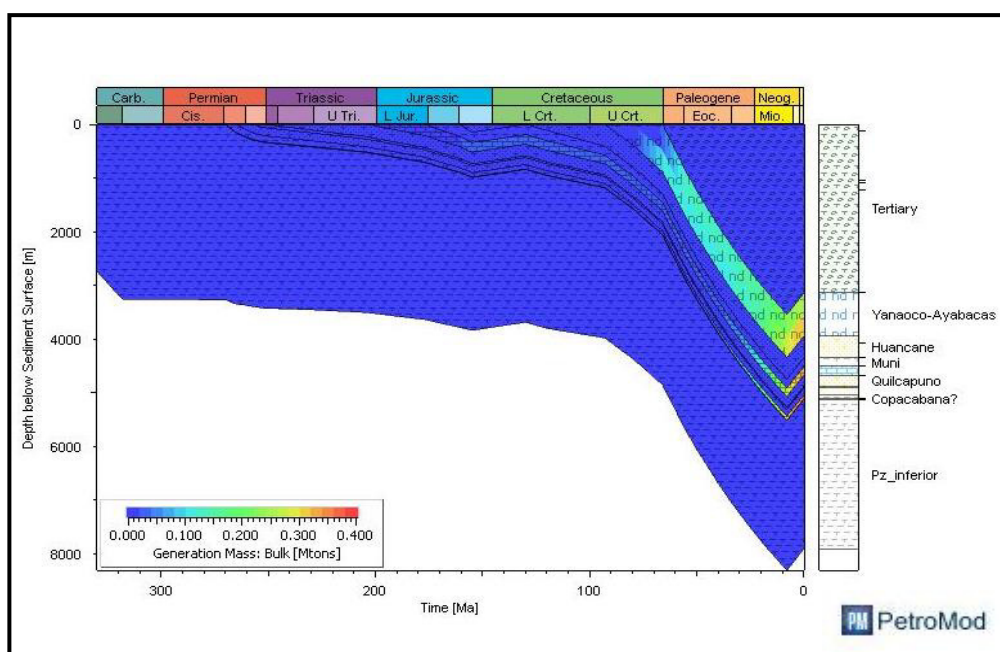


Fig. 97. Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de generación de hidrocarburos, desestimando el potencial del paleozoico inferior.

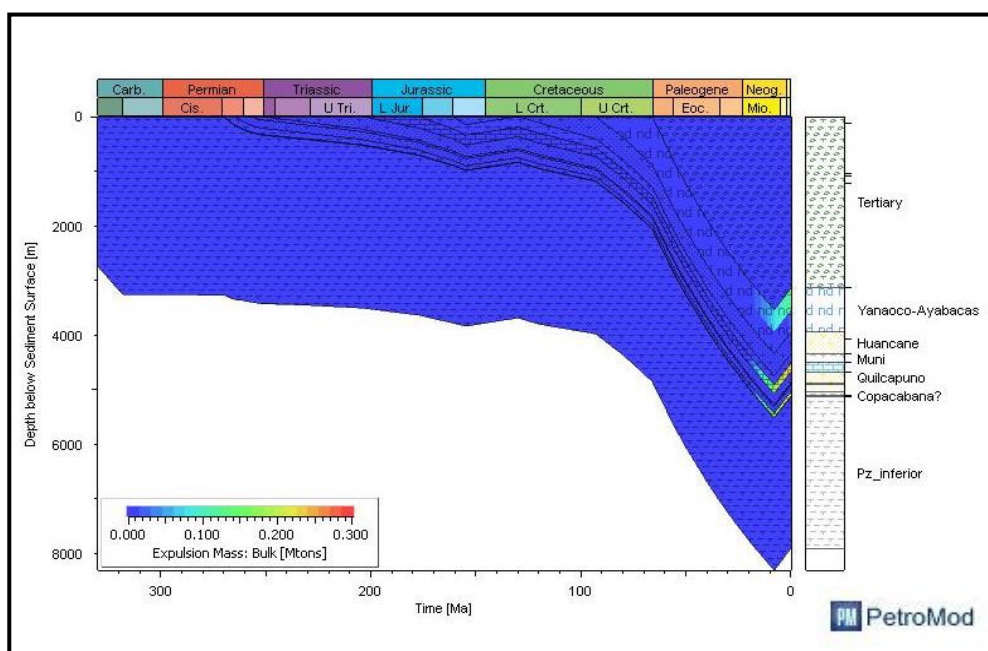


Fig. 98. Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de expulsión de hidrocarburos, desestimando el potencial del paleozoico inferior.

Como se puede apreciar en las figuras 97 y 98, la generación y expulsión para la formación Ene - Shale, el Grupo Lagunillas / Fm. Sipín y la Formación Ayabacas, quedan corroboradas a partir de estos modelos, lo que nos da a entender que podemos corroborar en primera instancia nuestras propuestas de sistemas petroleros para el área previamente postulados, sin embargo, hacemos un énfasis especial en la formación Ene, puesto que, estamos convencidos que tiene mucha implicancia con los pozos productores del otrora campo Pirín (Fig. 99 y Fig. 100).

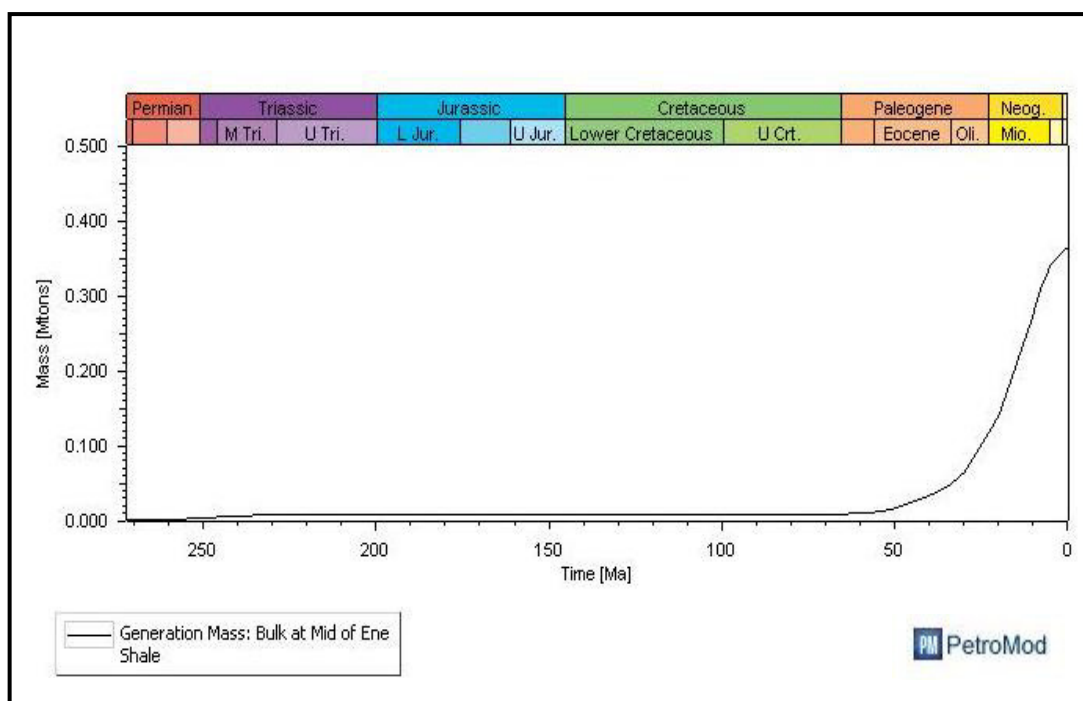


Fig. 99. Diagrama de estimación de la cantidad de generación versus tiempo, de la formación Ene Shale.

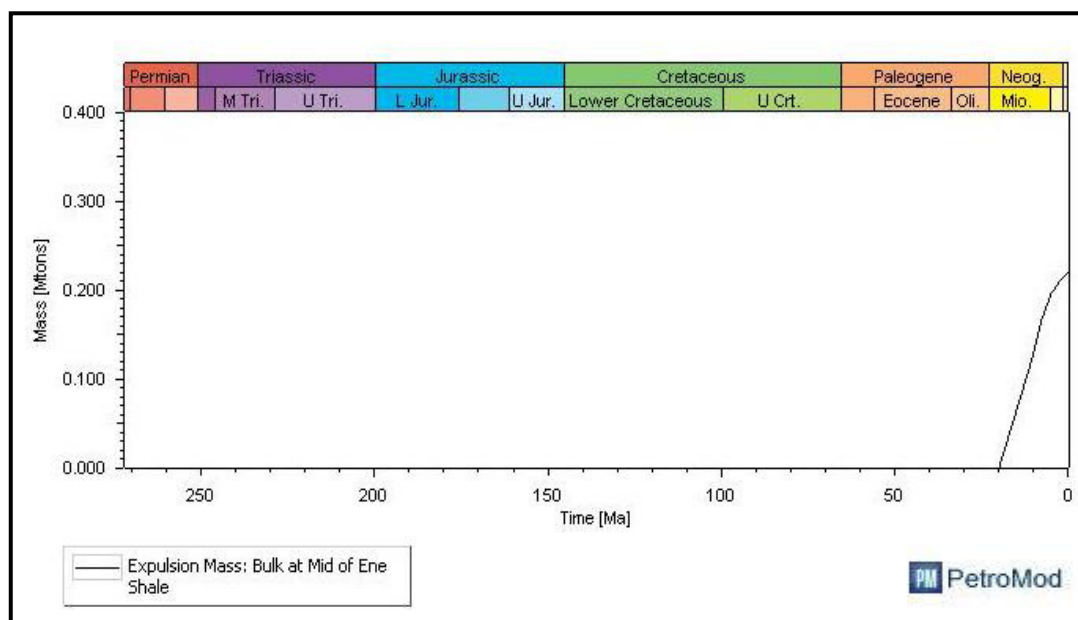


Fig. 100. Diagrama de estimación de la cantidad de expulsión versus tiempo, de la formación Ene Shale.

Como podemos apreciar la generación (Fig. 99), y más que todo la expulsión (Fig. 100) de la formación Ene - Shale es coherente con la generación de las estructuras, expuestas en capítulos anteriores, puesto que como se desprende de la imagen, la unidad empieza a expulsar aproximadamente a los 20 Ma, tiempo en el cual ya se encontraban desarrolladas las estructuras para este lado de la cuenca, lo que significa un importante aporte para la comprensión del sistema petrolero en el borde occidental.

Para poder analizar el entrapamiento de los hidrocarburos para este sector de la cuenca, este se torna muy dificultoso debido a la poca información de subsuelo (mala calidad de la información sísmica), previamente comentada, que interfiere en la delimitación de estructuras en profundidad que hayan podido almacenar petróleo y/o gas. Sin embargo con la extrapolación de datos de superficie al subsuelo así como la interpretación que mostramos, se ha podido establecer trampas estructurales ligadas a un sistema de tectónica compresiva, los cuales han podido facilitar la formación de pliegues tanto por flexión como propagación de falla, que albergan los reservorios previamente indicados y facilitan la acumulación, todos estos asociados a la intervención de una cuña intercútea responsable del acortamiento del borde occidental del área de estudio, los cuales se mostrarán en el análisis de los nuevos *plays* de exploración en los apartados siguientes.

5.2.2. Sistema Petrolero del Borde Oriental

5.2.2.1. Roca Generadora

Hacia la zona del dominio de la Faja Plegada del Altiplano, nos encontramos con la ausencia de análisis a detalle para poder contrastar la identificación de rocas madres. Sin embargo, es necesario mencionar que por analogía y en función de la interpretación del corte balanceado podemos corroborar la existencia de una correlación lateral de posibles niveles generadores para este sector de la cuenca.

Dicho esto, y apoyado también en los análisis realizados en el presente trabajo podemos considerar a las secuencias devónicas como una posible roca generadora, basado en valores análogos de TOC superiores al 3 %, así como intervalos de reflectancia de vitrinita, extrapolados a partir del desarrollo de este trabajo en la frontera Peruana - Boliviana, comprendidos entre 0.76 - 1.35 %.

Los niveles pérmico superiores también podrían considerarse como una roca madre en un sistema petrolero especulativo, puesto que se considera su correspondencia en profundidad hacia este lado de la cuenca, corroborado también en afloramientos más cercanos a la Cordillera Oriental, con valores probablemente análogos a los encontrados en las cercanías de Pirin.

Con referencia a los secuencias mesozoicas, la formación Muni, en su equivalente lateral al norte boliviano, presenta valores prometedores de TOC siendo superior al 1.20%, y basados en los estudios de Pan Andean Resources PLC (2010), esta unidad está asociada a un kerógeno tipo III y se encuentra en ventana de generación de petróleo y gas. Para este sector de la cuenca, la formación Muni estima un espesor aproximado de 250 m.

Para el caso de la formación Ayabacas, dicha secuencia fue erróneamente interpretada por Hermoza (Perupetro S.A., 2008) como niveles pérmico superiores en el sector de Yanaoco, sin embargo, se realizaron estudios para evaluar su prospectividad, brindándonos resultados alentadores como un TOC alrededor del 1.80%, así como valores de Ro comprendidos entre 1.19 y 2.01 %, evidenciando que dicha secuencia se encuentra en una avanzada madurez termal así como ubicable en la ventana de generación de gas. (Perupetro S.A., 2008). Para el sector, dicha formación puede ser restringida a espesores aproximados entre 300 y 400 m.

5.2.2.2 Roca Reservorio

Las rocas encargadas de almacenar hidrocarburos para este borde la cuenca, pueden ser consideradas de manera especulativa de manera análoga a los niveles fluvio - eólicos dentro del Grupo Ene y la Formación Quilcapunco, así como a las areniscas fluviales de la formación Huancané.

Para el caso de los reservorios paleozoicos la información que se tiene para esta parte de la cuenca, es insuficiente y solamente podríamos basarnos en nuestra interpretación de la correlación lateral de estos niveles a partir de los análisis en Pirin, así como de sus secuencias aflorantes al borde la Cordillera.

En lo que compete a las secuencias cretácica de la formación Huancané, dicha unidad se encuentra aflorando en casi todo este sector de la cuenca, mostrando clara evidencia de considerarlo un reservorio importante basado en el reconocimiento de sus facies fluviales con buena porosidad visual a lo largo del trabajo en campo, del presente estudio. En el área el espesor estimado para esta unidad es de 300 m.

5.2.2.3. Roca Sello

Los niveles de lutitas intercaladas en las secuencias del reservorio paleozoico análogo con los del área de Pirin, y las secuencias pelíticas al tope de la formación Huancané, podrían considerarse como los sellos que detienen la migración de hidrocarburos, almacenándose dentro de las identificadas rocas reservorios.

5.2.2.4. Generación, Migración, Entrampamiento y Análisis del Sistema Petrolero

Enfocados en el área oriental de la cuenca, postulamos los siguientes sistemas petroleros, basados en los estudios precedidos, Muni-Huancané(.), Ayabacas-Ayabacas (?) para poder estimar la posible acumulación de hidrocarburos en esta área.

De manera análoga como para el sector occidental, el modelado del sistema petrolero se realizó en el software Petromod 1D de Schlumberger, para este caso en el sinclinal de Vilquechico (Fig. 101), corroborado en afloramiento e identificable su distribución en profundidad, para poder idearnos del posible potencial de generación para el sector.

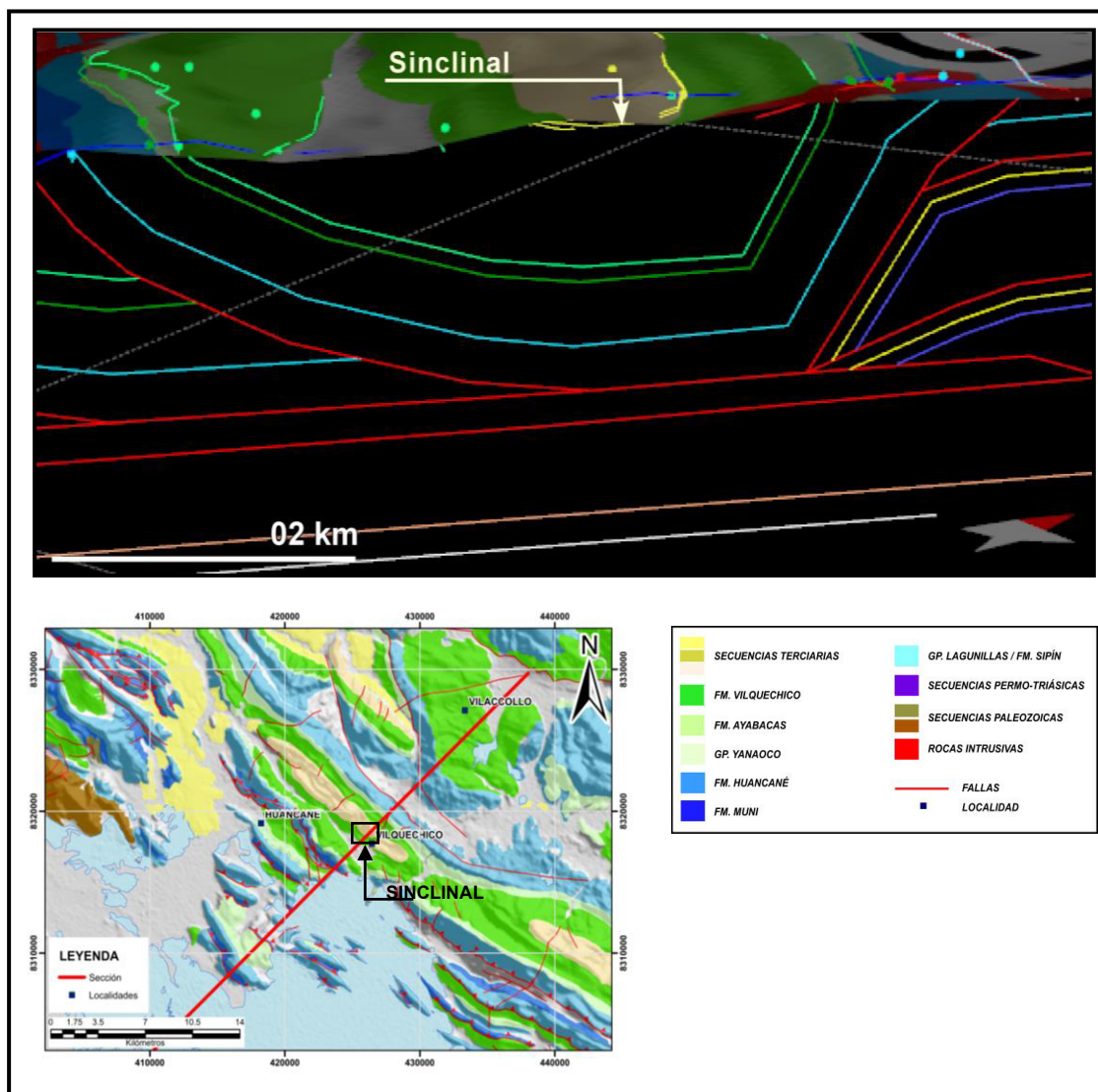


Fig. 101. Ubicación del sinclinal de Vilquechico, utilizado para la modelización geoquímica en el borde occidental del proyecto.

El flujo de trabajo fue el mismo que se realizó en el borde occidental del proyecto, por ende mostramos el diagrama de soterramiento contrastado con la temperatura para este sector (Fig. 102).

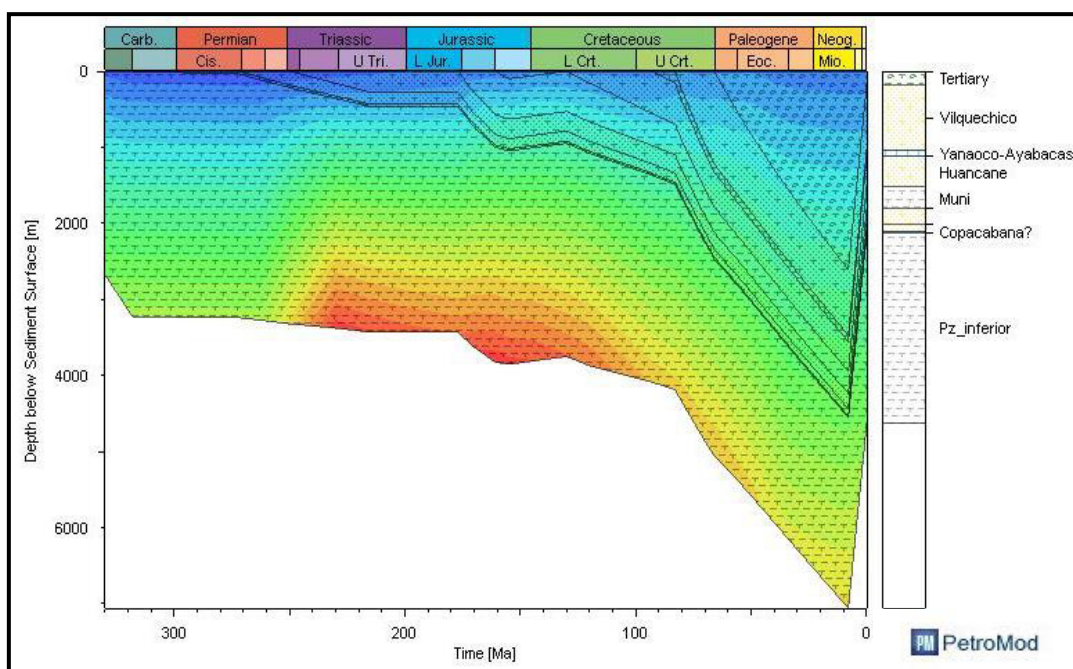


Fig. 102. Diagrama de soterramiento contrastado con los valores de temperatura para las formaciones designadas.

A partir de esta adecuada calibración y con la asignación de datos de TOC así como distintas variables previas a la modelización, nos fue posible realizar modelos de generación y expulsión para la evaluación del sistema petrolero en el borde oriental del proyecto. (Fig. 103 y Fig. 104)

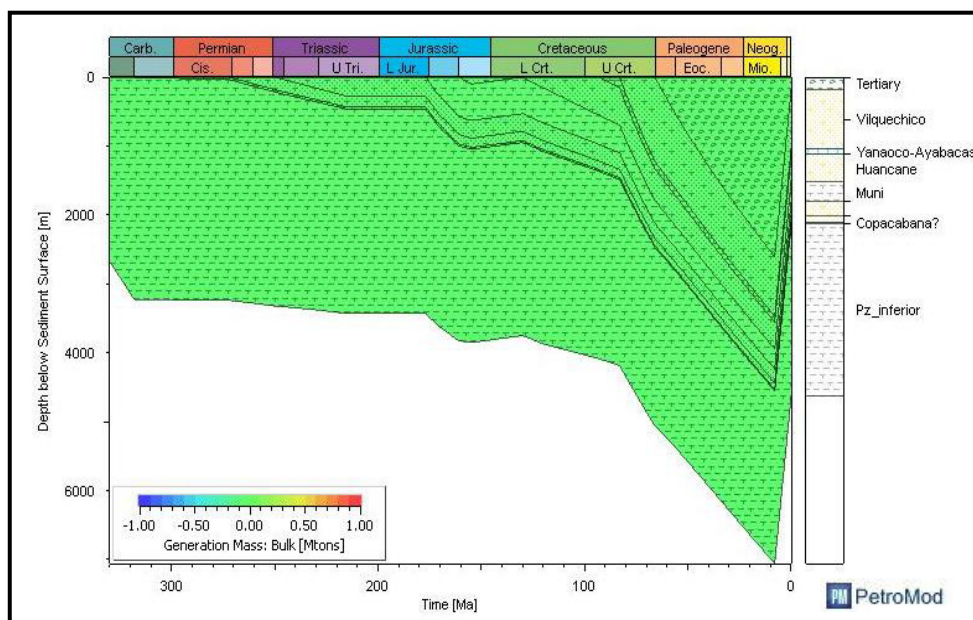


Fig. 103. Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de generación de hidrocarburos para las formaciones designadas.

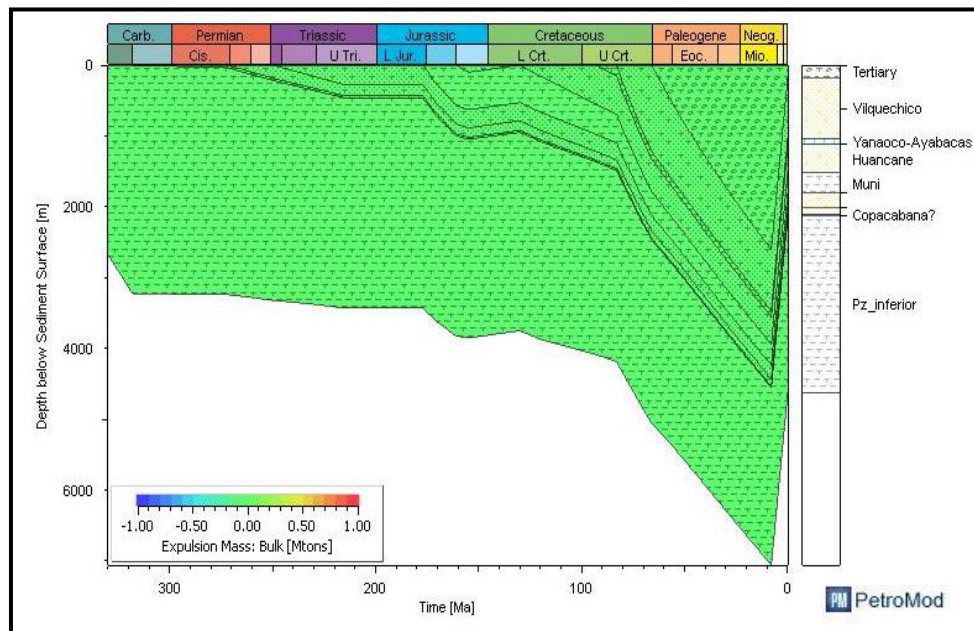


Fig. 104. Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de expulsión de hidrocarburos para las formaciones designadas.

Como se puede apreciar para este sector de la cuenca, no es posible apreciar intervalos de generación y expulsión con los datos ingresados, sin embargo consideramos que es necesario generar mayores estudios antes de desestimar dicha propuesta.

En lo que compete al estudio de las trampas que pudieran albergar el hidrocarburo en este sector, estas se desarrollan dentro del contexto de la Faja Plegada del Altiplano, las cuales se constituyen clásicamente de imbricaciones a partir de la estructura duplex tipo antiformal stack que origina la transferencia de energía para este sector de la cuenca, distinguible en el apartado posterior.

5.3. NUEVOS PLAYS DE EXPLORACION

A partir de la integración del análisis estructural, previamente validado con la construcción de la sección balanceada, y la evaluación del sistema petrolero en el área de trabajo, hemos podido discernir posibles plays de exploración enfocados en generar nuevas oportunidades energéticas para la cuenca.

Como sabemos, el *play* es uno o más prospectos relacionados; y un prospecto es una trampa potencial que debe ser evaluada para ver si contiene cantidades comerciales de petróleo. El play y el prospecto son conceptos usados por los exploracionistas para presentar un idea geológica que justifique la perforación de un pozo en busca de yacimientos no descubiertos de petróleo (Magoon, 1995). Así mismo, es necesario entender el concepto de *lead*, como aquella oportunidad o prospecto hipotético, el cual necesita mayor estudio o definición.

Bajo este sentido, consideramos distinguir dentro de ambos bordes de la cuenca, probables *plays* de exploración, contiendo estructuras potenciales para la generación de hidrocarburos.

En el borde occidental, es posible discernir 03 leads asociados, a estructuras tipo anticlinal (Fig. 105). Para el presente trabajo hemos nombrado de oeste a este, estas estructuras como Coata A y Coata B, así como Pirin A para la cuña intercutánea generadora de la deformación. (Fig. 106)

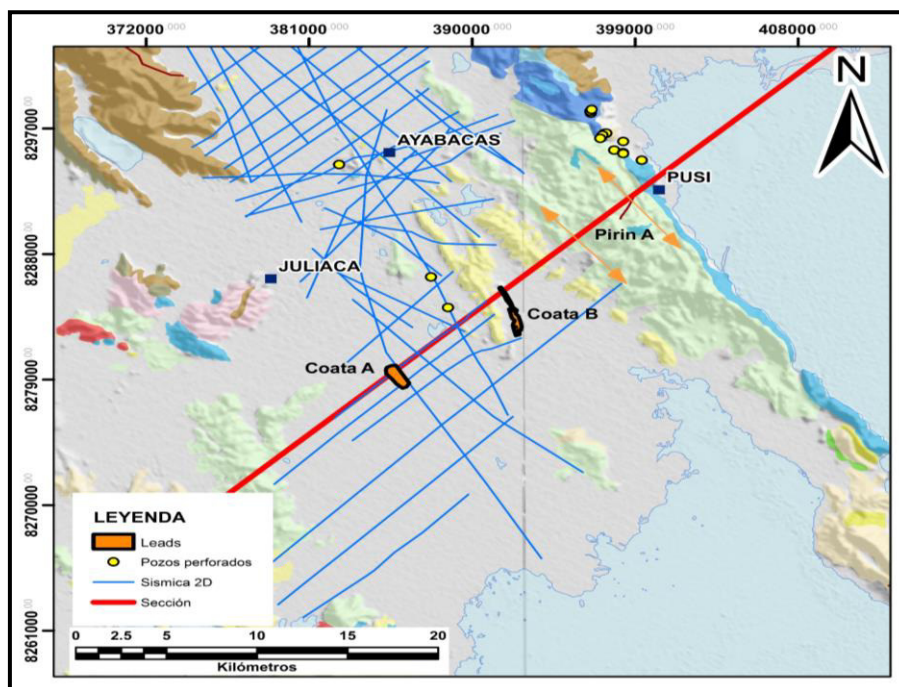


Fig. 105. Ubicación de los leads desarrollados para el borde occidental del proyecto.

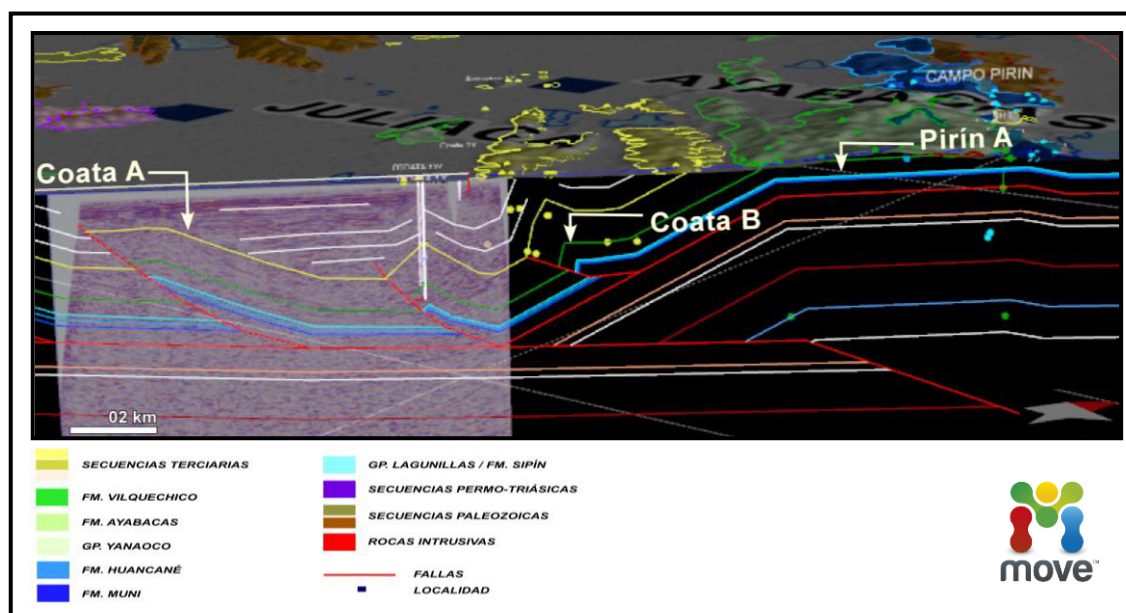


Fig. 106. Delimitación de las estructuras relacionadas a los leads señalados para el borde occidental del proyecto.

Tanto Coata A como Coata B, se encuentran en los ejes de anticlinales muy cercanos al pozo Coata 1X, los cuales facilitaron su correlación; así mismo para la estructura Coata B, es posible poder delimitarlo apoyados en la morfología que presenta en superficie. En el caso de la cuña intercutánica, consideramos que se manifiesta, en base a nuestra interpretación, como una potencial estructural la cual, es facilitada por la correlación a partir de los pozos ubicados en el Yacimiento Pirin, y puede corroborarse su distribución lateral de Norte a Sur, en base a los afloramientos devónicos ubicados en las cercanías del lago.

En el caso del borde oriental hemos discernido un lead de evaluación (Fig. 107), más aun tomando en cuenta que el análisis del sistema petrolero no nos muestra una generación hidrocarburos de la Formación Muni, considerada para esta zona como la roca generadora, sin embargo creemos que es necesario mayores estudios a detalle, sin desestimar la estructura, tipo *antiformal stack*, que es la encargada de transferir la deformación hacia la faja plegada eocena de Huarina (Fig. 108).

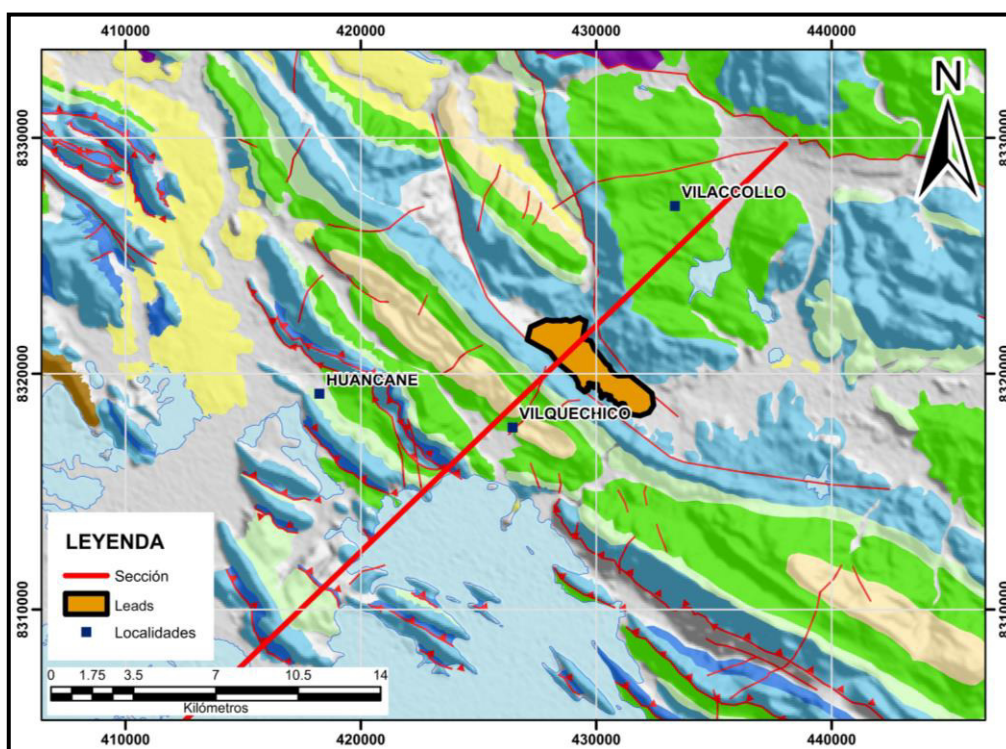


Fig. 107. Ubicación del lead desarrollado para el borde oriental del proyecto.

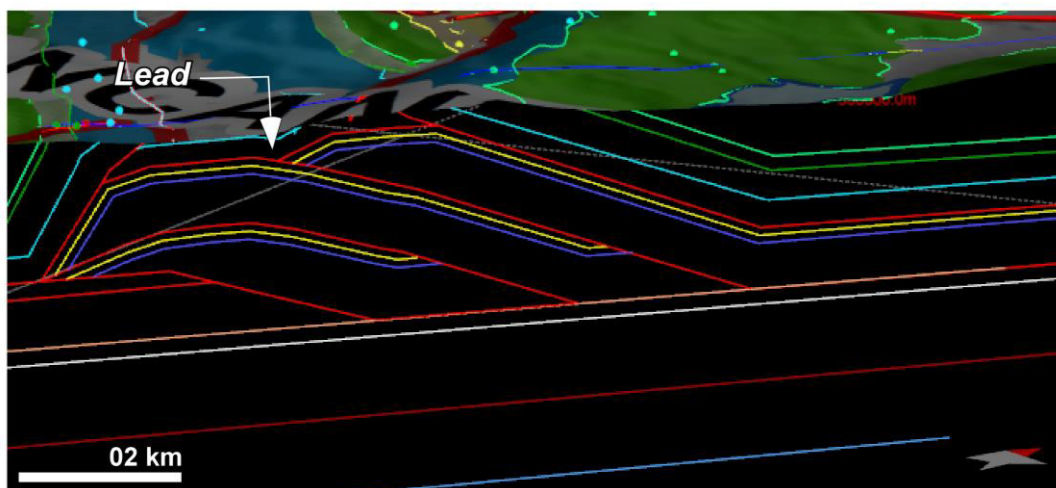


Fig. 108. Delimitación de las estructuras relacionadas al lead señalado para el borde oriental del proyecto.

Finalmente, consideramos necesario poder generar estudios a detalle para poder continuar con la evaluación de hidrocarburos, enfocados bajo nuestro criterio principalmente en sistemas petroleros paleozoicos, los que consideramos como gran potencial energético para la cuenca, así mismo somos conscientes de la complejidad de las estructuras, pero creemos que con una mayor densidad de la información de superficie y subsuelo, se podrá corroborar lo expuesto previamente.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES.....	133
6.2. RECOMENDACIONES	134

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El Altiplano Peruano presenta una evolución estructural ligada tanto a tectónica de piel delgada, para el lado oriental del sector (Faja Plegada de Huarina), como a una tectónica de piel gruesa con implicancia en el borde occidental (Estructura Pirín), ambas asociadas a esfuerzos con dirección E-W principalmente, de edad aproximada 40 M.a. (Eoceno Medio).

En base a la nueva interpretación sísmica, así como la revisión y adjudicación de nueva información de superficie, queda descartado en primera instancia, el modelo de inversión de rift, asociado a las unidades previamente identificadas como el Grupo Mitu, y asignados en el presente modelo como niveles conglomerádicos de la Fm. Huancané.

Por otra parte, los niveles evaporíticos previamente identificados como parte de la Formación Sipín o Grupo Lagunillas, quedan asignados en base a la nueva información y sustento respectivo, a niveles dentro de la Formación Ayabacas, aflorando en las cercanías al área de Pirin.

El nuevo modelo lito-estratigráfico propuesto, asociado a la sección estructural balanceada presentada en el estudio, corrobora la distribución de las principales secuencias sedimentarias a lo largo del corte longitudinal.

Los niveles involucrados en la deformación descritos en el corte estructural, son asignados hacia el lado occidental a secuencias paleozoicas superiores a partir de la transferencia de energía proveniente de una cuña intercutánea, abarcando basamento y pila sedimentaria. Para el lado oriental, el nivel de despegue jurásico de la Formación Muni, es producto del esfuerzo compresivo de una estructura tipo *antiformal stack* cuyos despegues se asocian también a secuencias paleozoicas superiores.

A partir de la restauración estructural del mencionado corte, cuya extensión es de 96.600 km, se pudo constatar que el acortamiento presentado es de 42.650 km, siendo el 30.60 % del valor de longitud se la sección; ubicando la mayor tasa de acortamiento hacia la morfo-estructura denominada Faja Plegada del Altiplano.

En base al coherente enfoque realizado en el presente proyecto, así como evidencia de *seeps* en lo largo de la zona estudio, se ha podido postular y modelar distintos sistemas petroleros, siendo los más relevantes, el propuesto para el lado occidental Ene - Ene (.) asociado a la generación de hidrocarburos para el otrora, yacimiento Pirin; así como el sistema petrolero Muni - Huancané (.) hacia el borde oriental, el cual necesita mayores estudios para su validación con la finalidad de contemplar la posibilidad de la existencia de recursos petrolíferos o gasíferos para este sector de la cuenca.

Se pudo delimitar distintos *plays* de exploración en base a la interpretación de la sección estructural balanceada, tanto para el borde oriental como occidental fundada en el agente de deformación que condiciona las estructuras previamente mostradas. Por tal motivo se considera que las trampas para la acumulación de hidrocarburos en la cuenca, obedecen a un tipo esencialmente estructural.

Consideramos necesario validar los postulamos que presentamos, puesto que mantenemos una posición expectante en base a la posibilidad de generar desarrollo energético para la región; sin embargo creemos imperativo realizar mayores estudios tanto en superficie como en subsuelo, puesto que con mayor densidad y una correcta interpretación podemos llegar a los resultados adecuados.

6.2. RECOMENDACIONES

Consideramos preponderante el desarrollo de adquisición de información de subsuelo, que pueda ameritar su posterior interpretación para así dilucidar en el entendimiento a detalle de la cuenca altiplánica.

Es necesario, realizar incisivos trabajos de campo con la finalidad de poder cartografiar a detalle las unidades aflorantes, puesto que consideramos que a la fecha existe mucha incertidumbre para la correcta descripción de cada una de las secuencias.

Poder generar un análisis geoquímico a detalle, con la finalidad de contrastar las relaciones genéticas de nuestra propuesta de una roca madre pérmica, tal y como sucede en las Cuencas Subandinas.

Enfatizar los estudios en el borde oriental del sector; puesto que a pesar de presentar una potencial trampa estructural, existe déficit en la información geoquímica, la que a la fecha desestima generaciones de hidrocarburos para esta parte de la cuenca.

CAPÍTULO VII. BIBLIOGRAFIA

CAPÍTULO VII. BIBLIOGRAFIA

Acosta, H., 2001, *Estratigrafía y Tectónica entre Azángaro, Putina y alrededores, norte del Lago Titicaca (Puno-Perú)*, Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Allcca, M., 2007, *La sub cuenca Pachitea: estructura, nueva estratigrafía y potencial hidrocarburífero*, Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería.

Allmendinger, R.W., 1986, *Tectonic development, southeastern border of the Puna Plateau, northwestern Argentine Andes*, *Geological Society of America Bulletin* 97, p. 1070-1082.

Armijo, R., Lacassin, R., Coudurier-Curveur, A., Carrizo D., 2015, *Coupled tectonic evolution of Andean orogeny and global climate*, *Earth-Science Reviews* 143, p. 1–35

Audebaud, E., 1978, *Etude géologique de la région de Sicuani et Ocongate (Cordillère orientale du Sud-péruvien)*, Tesis Doctoral, Universidad de Grenoble, 59 p.

Barnes, J.B., Ehlers, T.A., 2009, *End member models for Andean plateau uplift*, *Earth Science Reviews*.

Baby, P., Sempere, T., Oller, J., Barrios, L., Hérail, G., Marocco, R., 1990, *A late Oligocene–Miocene intermountain foreland basin in the southern Bolivian Altiplano*, *C. R. Acad. Sci., Ser. II* (311), 341 – 347.

Baby, P., Hérail, G., Salinas, R., Sempere, T., 1992, *Geometry and kinematic evolution of passive roof duplexes deduced from cross section balancing: example from the foreland thrust system of the southern Bolivian Subandean Zone*, *Tectonics* 11, 523 – 536.

Baby, P., Moretti, I., Guillier, B., Limachi, R., Mendez, E., Oller, J., Specht, M., 1995, *Petroleum system of the northern and central Bolivian Sub-Andean zone*, in Tankard, A.J., Suarez, R., Welsink, H.J. (Eds.), *Petroleum Basins of South America*, AAPG Mem., vol. 62, p. 445 – 458.

Baby, P., Rochat, P., Mascle, G., Hérail, G., 1997, *Neogene shortening contribution to crustal thickening in the back arc of the Central Andes*, *Geology* 25, 883 – 886.

Beck, S., Zandt, G., Myers, S., Wallace, T., Silver, P., Drake, L., and Minaya, E., 1996, *Anomalous crust in the Central Andes: Troisième symposium international sur la géodynamique Andine, Résumés étendus*, p. 13–16.

Bernal, I., Tavera, H., 2002, *Geodinámica, Sismicidad y Energía Sísmica en el Perú, Centro Nacional de Datos Geofísico / Instituto Geofísico del Perú*, p. 12 – 16.

Boyer, S. E., and D. Elliott, 1982, *Thrust systems, AAPG Bull.*, 66(9), 1196–1230.

Burg, J. P., A. Dolati, D. Bernoulli, and J. Smit, 2011, *Structural style of the Makran Tertiary accretionary complex in SE-Iran, GeoArabia, in press.*

Cabrera La Rosa, A., & Petersen, G., 1936, *Reconocimiento geológico de los yacimientos petrolíferos del departamento de Puno: Boletín del Cuerpo de ingenieros de Minas, Petroleo del Perú.* v. 115, 100 p.

Callot, P., 2008, *La Formation Ayabacas (limite Turonien-Coniacien, Sud-Pérou) : collapse sous-marin en réponse à l'amorce de l'orogénèse andine, Tesis Doctoral, Universidad Paul Sabatier – Francia.*

Carlotto, V.; Cárdenas, J.; Gil, W. & Chávez, R., 1995, *Sedimentología de la Formación Huancané (Neocomiano) de la región de Cusco y su relación con las variaciones del nivel del mar.: Bull. Inst. Fr. études andines.* v. 24., p. 1-21.

Chamberlain, R.T., 1910, *The Appalachian folds of Central Pennsylvania: Journal of Geology*, 18(3), p. 228-251.

Coney, P.J., Evenchick, C.A., 1994, *Consolidation of the American Cordilleras, J.S. Am. Earth Sci.* 7, 241 – 262.

Contreras-Pérez, J., 2010, *Un abordaje euleriano al problema del balanceo de secciones geológicas estructurales, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 27, núm. 1, p. 18 31.

Core Laboratories, Inc., 1996, *Hydrocarbon Source Rocks of the Sub-Andean Basins, Perú.*

Core Laboratories, Inc, 1999, *Geochemical Evaluation of Oils and Source Rocks and Oil - Source Rock Correlations, Sub-Andean Basins, Perú, Volume 1 Final Report Interpretation and Synthesis.*

Cristallini, E. 1998, *Introducción a las fajas plegadas y corridas; Buenos Aires. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales*, p. 9,10.

Dahlstrom, C.D.A., 1969, *Balanced cross sections: Canadian Journal of Earth Science*, 6(4), p. 743-757.

De Jong, K., 1974, *Melange (Olistostrome) near Lago Titicaca, Peru: The American Association of Petroleum Geologist Bulletin.* v. 58., p. 729-741.

Dunn, J.F., Hartshorn, K.G., Hartshorn, P.W., 1995, *Structural styles and hydrocarbon potential of the sub-Andean thrust belt of southern Bolivia*. In: A.J. Tankard, R. Suarez, H.J. Welsink (Editors), *Petroleum basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 62, p. 523-543.

Esput, N., Brusset S., Baby P., Hermoza W., Bolaños R., Uyen D., Déramond J., 2008, *Paleozoic structural controls on shortening transfer in the Subandean foreland thrust system, Ene and southern Ucayali basins, Peru*, *Tectonics*, vol. 27 p.TC3009.

Esput, N., Barbarand J., Roddaz M., Brusset S., Baby P., Saillard M., Hermoza W, 2011, *A scenario for late Neogene Andean shortening transfer in the Camisea Subandean zone (Peru, 12°S) : implications for growth of the Northern Andean Plateau*, *Geological Society Of America Bulletin*, vol. p.doi:10.1130/B30165.1.

GeoMark Research, 1996, *Peru Oil Study, Regional Petroleum Geochemistry of Crude Oils From Peru, Interpretative Volume and Aromatic Biomarker - Analytical Results*.

Gubbels, T.L., Isacks, B.L., Farrar, E., 1993, *High-level surfaces, plateau uplift, and foreland development, Bolivian central Andes*, *Geology* 21: 695-698.

Heim, A., 1947, *Estudios Tectónicos En La Región Del Campo Petrolífero De Pirín*. Bol. Direcc. Minas y Petroleo. V. 79., p. 7-47.

Horton, B. K., and P. G. DeCelles, 1997, *The modern foreland basin system adjacent to the central Andes*, *Geology*, 25, 895 – 898, 1997.

Horton, B. K., B. A. Hampton, and G. L. Waanders, 2001, *Paleogene synorogenic sedimentation in the Altiplano Plateau and implications for initial mountain building in the central Andes*, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 113, 1387 – 1400.

Infologic, 2006, *Petroleum Systems report. A Perupetro Project funded by the United States Trade Development Agency USTDA. Contributors include Geochemical Solutions and Baseline Resolution, Inc.*

Isacks, B.L., 1988, *Uplift of the Central Andean Plateau and bending of the Bolivian Orocline*, *Journal of Geophysical Research* 93, p. 3211-3231.

Jaillard, E.; Capetta, H.; Ellenberger, P.; Feist, M.; Grambast-fessard, N.; Lefranc, J.-P. & Sige, B., 1993, *The late cretaceous Vilquechico Group of Southern Perú, Sedimentology, paleontology, biostratigraphy, correlations.: Cretaceous Research. v. 14., p. 623-661.*

Jolivet, L., 1995, *La déformation des continents. Exemples régionaux Hermann, Paris.*

Kley, J., and Reinhardt, M., 1994, *Geothermal and tectonic evolution of the Eastern Cordillera and the subandean ranges of southern Bolivia*, in Reutter, K. J., Scheuber, E., and Wigger, P. J., eds., *Tectonics of the southern Central Andes*: Berlin, Springer-Verlag, p. 155–170.

Lamb, S., Hoke, L., 1997, *Origin of the high plateau in the central Andes, Bolivia, South America*, *Tectonics* 16: 623-649.

Laubacher, G., 1978, *Estudio geológico de la región norte del Lago Titicaca*. Boletín del Instituto de Geología y Minería V.S. Serie D, N° 5, p. 120.

Lavenu, A. and Mercier, J.L., 1991, *Evolution du régime tectonique de l'Altiplano et de la Cordillère Orientale des Andes de Bolivie du Miocène supérieur à l'Actuel*, *Géodynamique* 6(1), p. 21-55.

Louterbach, M., 2004, *Propagation du front orogénique Subandin et réponse sédimentaire associée sans le bassin d'avant-pays Amazonien (Madre de Dios, Pérou)*, Tesis Doctoral, Université Paul Sabatier - Francia.

Magoon, L., Dow, W., 1994, *The petroleum system*. En: Magoon, L., y Dow, W., (editores), 1994, *The petroleum system-from source to trap*: AAPG Memoir 60, p. 3 - 24.

Marocco, R. y Laubacher, G., 1990, *La Cuenca Cretácica del Altiplano Peruano: Litoestratigrafía e Interpretación Secuencial*. Boletín Sociedad Geológica del Perú v.81, pag 33-46.

Masek, J. G., B. L. Isacks, T. L. Gubbels, and E. J. Fielding, 1994, *Erosion and tectonics at the margins of continental plateaus*, *J. Geophys. Res.*, 99, 13,941 – 13,956.

McQuarrie, N., DeCelles, P.G., 2001, *Geometry and structural evolution of the central Andean Backthrust belt, Bolivia*, *Tectonics* 17, p. 203 – 220, p. 669-692.

McQuarrie, N., Barnes, J., Ehlers, T., 2008, *Geometric, kinematic, and erosional history of the central Andean Plateau, Bolivia (15–17°S)*, *Tectonics*, Vol. 27, TC3007.

Mouret, P., Brusset, S., Baby, P., Espurt, N., 2012, *Reconstitution De L'Architecture structurale des Bassins D'avant Arc De Talara et Tumbes Dans Le Nord Du Perou*, Memoria de Master, Universidad Paul Sabatier - Francia.

Newell, N., 1949, *Geology of the Titicaca region, Peru and Bolivia*: Geological Society of America Memoir. v. 36, 111 p.

Ordóñez, M., 1995, *Geología y posibilidades petrolíferas del área Acora, Juliaca. Cuenca Titicaca-Puno*. Tesis de Grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Palacios, O.; De La Cruz, J.; De La Cruz, N.; Klinck, N.; Allison, R. & Hawkins, M., 1993, *Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del Lago Titicaca-Sur del Perú*, INGEMMET.

PetroAndes S.A., 1992, *Informe Geofísico Preliminar del Lote S-3, Cuenca Titicaca.*

PetroAndes S.A., 1994, *Informe del Levantamiento Sísmico del Lote S-3, Cuenca Titicaca.*

Perupetro S. A., 2008, *The Hydrocarbon Potential of Titicaca Basin, Titicaca Basin Technical Report, p. 108.*

Poblet, J., 2004, *Geometría y Cinemática de pliegues relacionados con cabalgamientos, Trabajos de Geología, Univ. De Oviedo, 24, p. 127 – 246.*

Roeder, D., 1988, *Andean-age structure of Eastern Cordillera (Province of La Paz, Bolivia). Tectonics 7, p. 23-39.*

Reliance Exploration & Production DMCC, Sucursal del Perú & Pan Andean Resources PLC (Perú), 2010, *Evaluation Report Block 141 Titicaca basin, Peru Exploration Period – I, p. 72.*

Rich, J., 1934, *Mechanics of low – angle overthrust faulting as illustrated by the Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky, and Tennessee, AAPG, Bull, 18, p. 1584-1596.*

Rochat, P., Hérail, G., Baby, P., Mascle, G. and Aranibar, O., 1998, *Analyse Géométrique et Modèle Tectosédimentaire de L’Altiplano Nord-Bolivien. C. R. Acad. Sci. Paris, Earth and Planetary Sciences, Tectonics, Elsevier, Paris. Partial English version.*

Rochat, P., 2002, *Structures et Cinématique de l’altiplano Nord-Bolivien, Tesis Doctoral, Universidad Joseph Fourier – Francia.*

Rodgers, J., 1971, *The Taconic Orogeny: Geological Society of America Bulletin, v.82, p. 1141-1178.*

Roeder, D., and Chamberlain, R. L., 1995, *Structural geology of sub-andean fold-and-thrust belt in northwestern Bolivia, in Tankard, A. J., Suárez, S. R., and Welsink, H. J., eds., Petroleum basins of South America: American Association of Petroleum Geologists Memoir 62, p. 459–479.*

Schlumberger, 2009, *Modelado de Cuencas y Sistemas Petroleros, Oilfield Review: Volumen 21 N° 2.*

Schmitz, M., 1994, *A balanced model of the southern Central Andes: Tectonics, v. 13, p. 484–492.*

Scrocca, D., 2010, *Southern Apennines: structural setting and tectonic evolution*, *Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition*, ISSN 1441-8142, volume 36, paper 13.

Sempere, T., 1995, *Phanerozoic evolution of Bolivia and adjacent regions*, in *Petroleum Basins of South America*, edited by A. J. Tankard, R. Suárez Soruco, and H. J. Welsink, AAPG Mem., 62, 207 – 230.

Sempere, T., R.F. Butler, D.R. Richards, L G. Marshal, W. Sharp, and C.C. Swisher, 1997, *Stratigraphy and chronology of late Cretaceous – early Paleogene strata in Bolivia and northern Argentina*, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 109, 709 – 727.

Sempere, T.; Acosta, H. & Carlotto, V., 2000, *Estratigrafía del Mesozoico y Paleógeno en la región del lago Titicaca: hacia una solución* En: *X Congreso Peruano de Geología. Resúmenes*; S. G. d. Perú (eds.), *Sociedad Geológica del Perú*.

Sempere, T., Jacay, J., Pino, A., Bertrand, H., Carlotto, V., Fornari, M., García, R., Jiménez, M., Marzoli, A., Meyer, C.A., Rosas, S. & Soler, P., 2004, *Estiramiento litosférico del Paleozoico Superior al Cretáceo Medio en el Perú y Bolivia*, *Publ. Especial Soc. Geol. Perú*, 5, p. 45-79.

Sheffels, B., 1990, *Lower bound on the amount of crustal shortening in the central Bolivian Andes*, *Geology* 18: 812-815.

SovGeoInfo, 2003, *Potential Evaluation of Peruvian Petroleum Prospects*, *Altiplano Basin*.

Suppe, J., 1983, *Geometry and kinematics of fault-bend folding*: *American Journal of Science*, 283, p. 684-721.

Vieira C.E.L., Iannuzzi, R., Guerra-Sommer, M., Diaz-Martinez, E. And Grader, G.W., 2004, *Permian plants from the Chutani Formation (Titicaca Group, northern Altiplano of Bolivia): I. Genera Pecopteris and Asterotheca*. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*. ISSN 0001-3765, p. 117-128.

Witt, C., 2011, *Sistemas Compresivos y Evolución de Fajas Plegadas*, VII INGEPET, Lima-Perú.

Woodward, N.B., Boyer, S.E., Suppe, J., 1985, *An outline of balanced cross-sections*, 2nd edition: *Tennessee, University of Tennessee, Department of Geological Sciences, Studies in Geology* 11, 170 p.

Yugansk Petro Andes S.A., 1994, *Recomendación para Perforar el Pozo Exploratorio Coata 1X, Lote S-2, Juliaca, Puno*.

Yugansk Petro Andes S.A., 1995, *Informe de la Completación y Abandono del Pozo Coata 1X (Informe Final del Pozo Exploratorio Coata 1X), Cuenca Titicaca, Puno-Perú*.

Yugansk Petro Andes S.A., 1996, *Prognosis de la Perforación del Pozo Coata 2X.*

Yugansk Petro Andes S.A., 1997, *Informe Final del Pozo exploratorio Coata 2X.*

Yuganskneftegas S.A. Sucursal Peruana, 1996, *Parámetros del Levantamiento Sísmico. Plan de Exploración. Contrato de Licencia Lote S-4.*

Yuganskneftegas S.A. Sucursal Peruana, 1998a, *Pozo Well Ayabacas S4-38-1X, Drilling Reports.*

Yuganskneftegas S.A. Sucursal Peruana, 1998b, *Informe Final del Pozo exploratorio Ayabacas S4-38-1X.*

Yukos, 2002, *Altiplano Basin, Potential Evaluation of Peruvian Petroleum Prospects within the Framework of the Technical Evaluation Agreement between “YUKOS” Oil Company and “PeruPetro” company, TEA blocks S-2 and S-4.*

Knoll, A., Summons, R., Waldbauer, J., Zumberge, J., 2007, *The Geological Succession of Primary Producers in the Oceans in Evolution of Primary Producers in The Sea, Elsevier Academic Press.*

Webs:

- **Información de Modelos de Elevación Digitales (DEM's) gratuitas.**
<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>
- **Información de Imágenes Satelitales gratuitas.**
<http://landsat.gsfc.nasa.gov>

CAPÍTULO VIII. ANEXOS

8.1. LISTA DE FIGURAS.....	143
8.2. LISTA DE FOTOS	149
8.3. LISTA DE ANEXOS	150
8.4. LISTA DE TABLAS.....	159

CAPÍTULO VIII. ANEXOS

8.1. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. *Ubicación y Extensión de la Cuenca Titicaca.*

Figura 2. *Ubicación y Extensión del área de trabajo.*

Figura 3. *Ubicación y Extensión de las Áreas Nacionales dentro del área de trabajo.*

Figura 4. *Ubicación de la sección balanceada propuesta.*

Figura 5. *Flujo de trabajo para la construcción de un corte balanceado (Modificado de Mouret et al., 2012).*

Figura 6. *Flujo de trabajo para el Modelado de Sistemas Petroleros (Schlumberger, 2009).*

Figura 7. *Imagen satelital mostrando la orientación preferencial de la Cordillera de los Andes.*

Figura 8. *Mapa de elevación digital (DEM) mostrando las unidades morfoestructurales de la Cordillera de los Andes.*

Figura 9. *Corte estructural regional W - E (21° S) mostrando las principales estructuras de los Andes (Armijo et al., 2015).*

Figura 10. *Ubicación de las secciones estructurales desarrolladas (Baby et al., 1997)*

Figura 11. *Cortes balanceados mostrando la morfología actual de los Andes Centrales (Baby et al., 1997).*

Figura 12. *A y B. Imagen mostrando las edades de deformación y exhumación de la zona de estudio. (Bernes y Ehlers, 2009).*

Figura 13. *Cuadro desarrollado por Newell D. (1949) describiendo las unidades estratigráficas que reconoció su trabajo de campo.*

Figura 14. *Columnas generalizadas de los diferentes autores a lo largo de los años.*

Figura 15. *Columna estratigráfica utilizada por las empresas PetroAndes S.A. y Yugansk Oil Company para el desarrollo de sus trabajos.*

Figura 16. *Columna Estratigráfica desarrollada por Acosta H. (2001).*

Figura 17. *Ubicación de los antiguos lotes de contrato (Yukos Oil Company, 2003).*

Figura 18. *Columnas estratigráficas empleadas por las empresas Yukos Oil Company y Siboi del Perú (2006).*

Figura 19. *Distribución de las unidades sedimentarias a lo largo de la transecta Molleno - Putina (Sempere, 2002).*

Figura 20. *Columna estratigráfica desarrollada por Callot (2009).*

Figura 21. *Columna estratigráfica de Hermoza (Perupetro S.A., 2008).*

Figura 22. *Dataciones compiladas de las unidades formacionales del área de estudio.*

Figura 23. *Evolución de las interpretaciones estructurales del Área de Pirin.*

Figura 24. *Sección estructural desarrollada por Acosta (2001).*

Figura 25. *Sección estructural publicada por Perupetro S.A. (Infologic, 2006).*

Figura 26. *Sección esquemática desarrollada por Hermoza (Perupetro S.A., 2008).*

Figura 27. *Sección estructural desarrollada por Hermoza (Perupetro S.A., 2008).*

Figura 28. *Área de extensión de los fieldtrips desarrollados por Perupetro S.A. en el 2006-2007.*

Figura 29. *Recorrido del Fieldtrip IRD - YPFB 2014.*

Figura 30. *Secciones desarrolladas en el Fieldtrip 2014.*

Figura 31. *Sección estructural esquemática descrita en el Estrecho de Tiquina.*

Figura 32. *Columna descrita por Vieira et al. (2004) en el Estrecho de Tiquina, señalando la secuencia objeto de datación.*

Figura 33. *Ubicación del trabajo de campo desarrollado en el Estrecho de Tiquina.*

Figura 34. *Secuencias devónicas mostrando estratos de crecimiento, evidencia una actividad tectónica en esta época (ALT-57).*

Figura 35. *Secuencias granodecrecientes pérmicas aflorantes en el Estrecho de Tiquina. Nótese que se registra actividad sin-tectónica evidenciada en los estratos de crecimiento mostrados (ALT-58).*

Figura 36. *Ubicación de la sección desarrollada al norte del Lago Titicaca.*

Figura 37. *Sección interpretada en la localidad de Japis.*

Figura 38. *Pozos perforados en la Cuenca Titicaca.*

Figura 39. *Columna estratigráfica del pozo Ayabacas 1X (Modificado de Perupetro S.A., 2008)*

Figura 40. *Columna estratigráfica del pozo Coata 1X (Modificado de Perupetro S.A., 2008).*

Figura 41. *Imagen Landsat mostrando la disposición de las Formaciones Ayabacas y Huancané.*

Figura 42. *Imagen Landsat mostrando la disposición de las Formaciones Ayabacas y Huancané aflorantes en el campo Pirin.*

Figura 43. *Columna estratigráfica del pozo RH - 1 (Modificado de Perupetro S.A., 2008).*

Figura 44. *Columna estratigráfica generalizada propuesta para el área de estudio.*

Figura 45. *Correlación estratigráfica de los pozos representativos del área de trabajo*

Figura 46. *Correlación estratigráfica de las unidades pérmico superiores - triásicas entre el Pongo de Mainique, Pongo de Coñec, Pozo RH - 1 y el Estrecho de Tiquina.*

Figura 47. *Flattening a la base de Lower Nia (Quilcapunco, para el Altiplano) para enfatizar en las unidades pérmico superiores, distribuidas entre el Pongo de Mainique, Pongo de Coñec, Pozo RH - 1 y el Estrecho de Tiquina.*

Figura 48. *Diagrama lito-estratigráfico mostrando la distribución de las secuencias sedimentarias a lo largo del área de estudio.*

Figura 49. *Ubicación y extensión regional de la principal unidad morfo-estructural del área de estudio.*

Figura 50. *Esquema de la morfología de las Fajas Plegadas y Corridas, tanto en márgenes activos (A) como en márgenes pasivos (B) (Witt, 2011).*

Figura 51. *Desarrollo de una sección estructural considerando la deformación existente asociada una tectónica de piel delgada (Espurt et al., 2011).*

Figura 52. *Desarrollo de una sección estructural considerando la deformación existente asociada una tectónica de piel gruesa (Scrocca, 2010).*

Figura 53. *Modelo característico de la estructura tipo duplex.*

Figura 54. *Modelo característico de la estructura tipo imbricación.*

Figura 55. *Esquema de los principales pliegues asociados a la morfología de las fallas (Witt, 2011).*

Figura 56. *Modelo de un pliegue por flexión de falla (Poblet, 2004).*

Figura 57. *Modelo de un pliegue por propagación de falla (Poblet, 2004).*

Figura 58. *Modelo de un pliegue por despegue (Poblet, 2004).*

Figura 59. *Contraste de los distintos mapas LANDSAT utilizados (<https://landsat.gsfc.nasa.gov>).*

Figura 60. *Distribución de las fallas reconocidas apoyadas en el Modelo de Elevación Digital (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>).*

Figura 61. *Ejemplo del trabajo efectuado, superponiendo las imágenes satelitales con los DEM's. Nótese que facilita la interpretación de elementos estructurales en el área.*

Figura 62. *Mapa geológico del área de estudio.*

Figura 63. *Mapa geológico mostrando la Faja Plegada del Altiplano, que conforma el borde oriental para el presente trabajo.*

Figura 64. *Mapa geológico mostrando el borde occidental del sector, donde ubicamos al otrora Yacimiento Pirin.*

Figura 65. *Ubicación de la información de subsuelo en el área de estudio.*

Figura 66. *Ubicación de la línea sísmica S2-41 y de la sección estructural regional construida en el proyecto.*

Figura 67. *Imagen mostrando la mala calidad de la información sísmica existente, tomadas como ejemplo (a) S2-02 (b) S2-05 (c) S3-11 (d) S2-29.*

Figura 68. *Interpretación de la línea sísmica S2-41 desarrollada para el presente proyecto.*

Figura 69. *Línea sísmica 99-110, tomada como ejemplo para mostrar la recolección de la información de las velocidades RMS.*

Figura 70. *Modelo del tratamiento de la información en una hoja de cálculo, generando así el diagrama tiempo - profundidad de la línea en cuestión.*

Figura 71. *Interfaz de conversión de la línea sísmica a partir del análisis del Vo y la constante k para el presente proyecto.*

Figura 72. *Imagen mostrando la importancia de una correcta conversión para continuar con el desarrollo de la interpretación de la sección estructural.*

Figura 73. *Ubicación de la sección estructural desarrollada en el proyecto.*

Figura 74. *Sección estructural desarrollada en el proyecto actual.*

Figura 75. *Sección estructural desarrollada en el proyecto, enfocada en mostrar el borde occidental (Campo Pirin).*

Figura 76. *Sección estructural desarrollada en el proyecto, enfocada en mostrar el borde oriental (Faja Plegada del Altiplano).*

Figura 77. *Restricción 04 en el desarrollo de la construcción de una sección balanceada.*

Figura 78. *Restricción 05 en el desarrollo de la construcción de una sección balanceada.*

Figura 79. *Esquema del método de longitudes de líneas estratales.*

Figura 80. *Esquema del método de balance de áreas.*

Figura 81. *Ubicación y extensión del corte estructural realizado.*

Figura 82. *Esquema del corte balanceado construido en el sector occidental.*

Figura 83. *Esquema del corte balanceado construido en el sector oriental. Fig. 83. Esquema del corte balanceado construido en el sector oriental.*

Figura 84. *Imagen mostrando la profundidad del despegue jurásico para el borde occidental del sector, a partir de la información de superficie.*

Figura 85. *Sección balanceada regional desarrollada en el presente trabajo.*

Figura 86. (A) *Modelo de sección balanceada desarrollada por Espurt et al. (2008).* (B) *Interpretación sísmica en la que se distingue la transferencia de energía de basamento (Shira thrust) a pila sedimentaria (San Martin thrust).*

Figura 87. (A) y (B) *Sección balanceada desarrollada por Espurt et al. 2011, en el área de Camisea. Nótese en la figura (B) los duplex asociados al acortamiento del frente de la zona de Camisea.*

Figura 88. *Ubicación geográfica del Yacimiento Pirin.*

Figura 89. *Simulación de los procesos geológicos, térmicos y de flujo de fluido en las cuencas sedimentarias a través del tiempo (Schlumberger, 2009).*

Figura 90. *Diagrama estratigráfico de las secuencias sedimentarias mostrando la relación con el sistema petrolero de la cuenca altiplánica peruana.*

Figura 91. *Ubicación de los afloramientos y pozos, de donde se extrajeron las muestras para los análisis geoquímicos (Infologic, 2006).*

Figura 92. *Sección delgada mostrando posibles reservorios carbonatados oolíticos de la Formación Ayabacas en el pozo Coata 1X (MD: 1894-1898) (Yukos, 2003).*

Figura 93. *Ubicación del sinclinal utilizado para la modelización geoquímica en el borde occidental del proyecto.*

Figura 94. *Diagrama de soterramiento contrastado con los valores de temperatura para las formaciones designadas.*

Figura 95. *Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de generación de hidrocarburos para las formaciones designadas.*

Figura 96. *Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de expulsión de hidrocarburos para las formaciones designadas.*

Figura 97. *Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de generación de hidrocarburos, desestimando el potencial del paleozoico inferior.*

Figura 98. *Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de expulsión de hidrocarburos, desestimando el potencial del paleozoico inferior.*

Figura 99. *Diagrama de estimación de la cantidad de generación versus tiempo, de la formación Ene Shale.*

Figura 100. *Diagrama de estimación de la cantidad de expulsión versus tiempo, de la formación Ene Shale.*

Figura 101. *Ubicación del sinclinal de Vilquechico, utilizado para la modelización geoquímica en el borde occidental del proyecto.*

Figura 102. *Diagrama de soterramiento contrastado con los valores de temperatura para las formaciones designadas.*

Figura 103. *Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de generación de hidrocarburos para las formaciones designadas.*

Figura 104. *Diagrama de soterramiento contrastado con los intervalos de expulsión de hidrocarburos para las formaciones designadas.*

Figura 105. *Ubicación de los leads desarrollados para el borde occidental del proyecto.*

Figura 106. *Delimitación de las estructuras relacionadas a los leads señalados para el borde occidental del proyecto.*

Figura 107. *Ubicación del lead desarrollado para el borde oriental del proyecto.*

Figura 108. *Delimitación de las estructuras relacionadas al lead señalado para el borde oriental del proyecto.*

8.2. LISTA DE FOTOS

Foto 1. *Imagen mostrando seep gas a lo largo del recorrido del Fieldtrip 2006.*

Foto 2. *Imagen mostrando el potencial reservorio de las secuencias continentales de la Fm. Huancané.*

Foto 3. *Afloramiento de secuencias carbonatadas pérmicas en el Estrecho de Tiquina (ALT-76).*

Foto 4. *Afloramiento de secuencias devónicas intensamente deformadas (ALT-69).*

Foto 5. *A. Secuencias granodecrecientes, niveles de areniscas cuarzosas intercaladas con limolíticos interpretadas como la Formación Quilcapunco. (ALT - 98) B. Vista ampliada de los niveles de areniscas cuarcíticas grisáceas claras de grano fino.*

Foto 6. *Contrastes litológicos en la identificación de las distintas areniscas de la Formación Quilcapunco (A) y Formación Huancané (B) (ALT - 99).*

Foto 7. *Discordancia erosiva angular entre las formaciones Huancané y Muni, en cercanías a la localidad de Jaspi (ALT-106).*

Foto 8. *A. Secuencia rítmica pelítica de la formación Vilquechico. B. Ampliación de las secuencias de lutitas, mostrando los restos fósiles de plantas (ALT-107)*

Foto 9. *Core extraído del pozo Coata 1X, entre los 1731 m - 1734 m. Descrita como caliza gris verdosa mudstone - brechosa con clastos de calizas negras.*

Foto 10. *Imagen mostrando las secuencias de areniscas eólicas de la Fm. Huancané (Perupetro S.A., 2008).*

Foto 11. *Afloramiento mostrando la base de la formación Yanaoco (368 - 8351), con presencia de clastos de naturaleza cuarzosa superiores a los 0.5 cm (Acosta, 2001).*

Foto 12. *Imagen mostrando la disposición de los clastos subredondeados en una matriz calcárea atribuido a la Formación Ayabacas (ALT-117).*

8.3. LISTA DE ANEXOS

Anexo 01. *Mapa geológico del cuadrángulo de Putina (30–x).*

Anexo 02. *Mapa geológico del cuadrángulo de Juliaca (31–v).*

Anexo 03. *Mapa geológico del cuadrángulo de Huancané (31–x).*

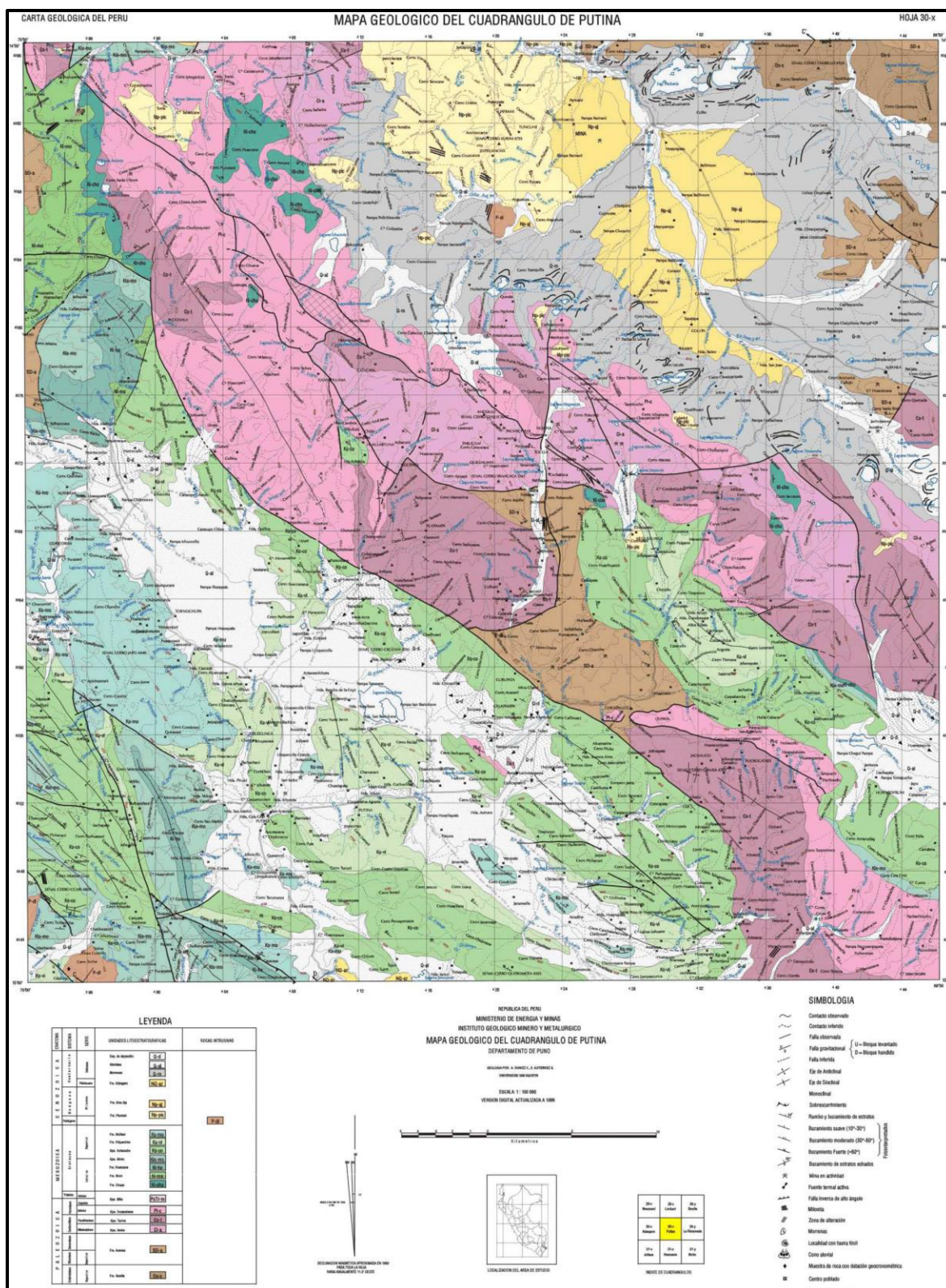
Anexo 04. *Mapa geológico del cuadrángulo de Moho e Isla Soto (31–y / 32 y).*

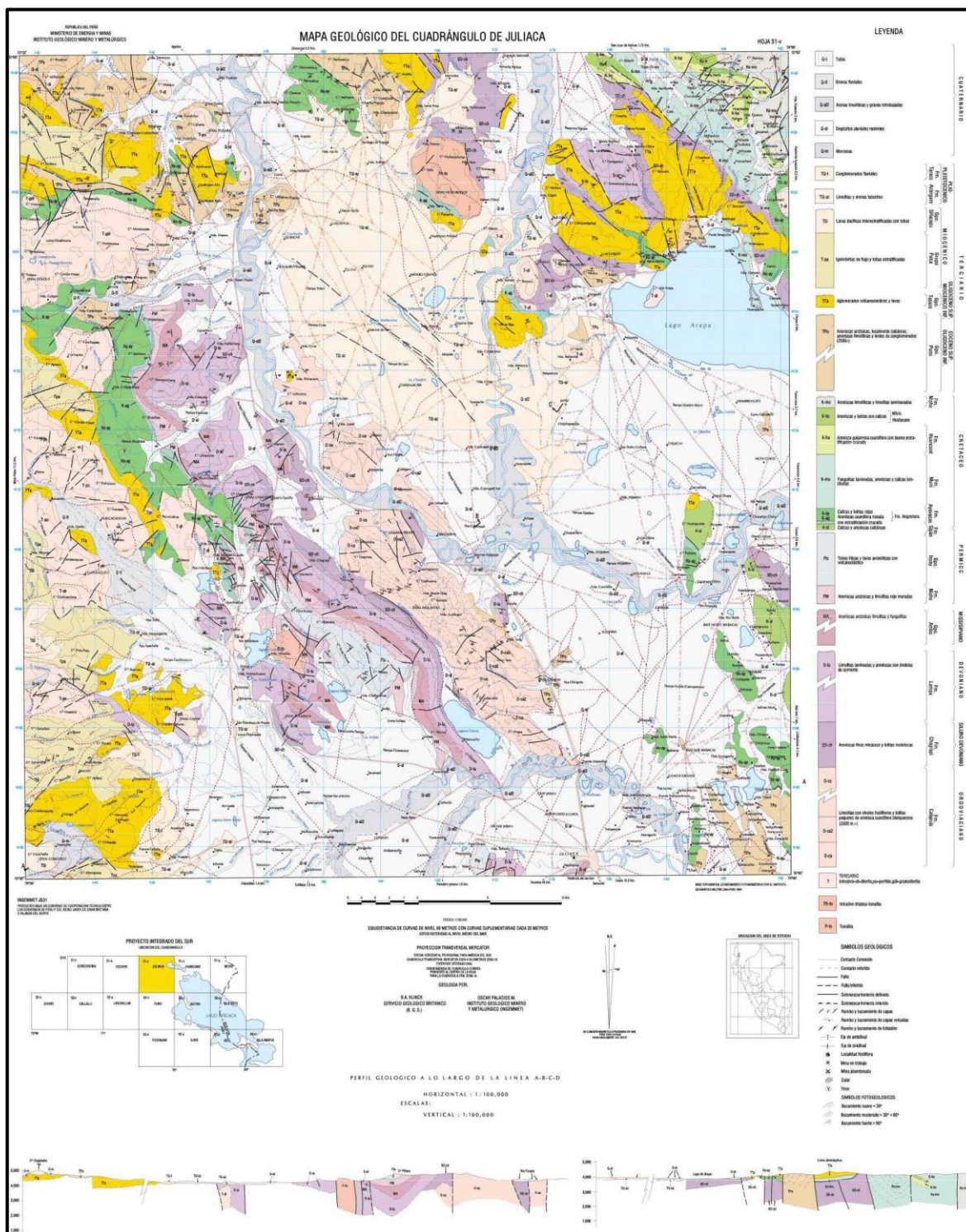
Anexo 05. *Mapa geológico del cuadrángulo de Puno (32–v).*

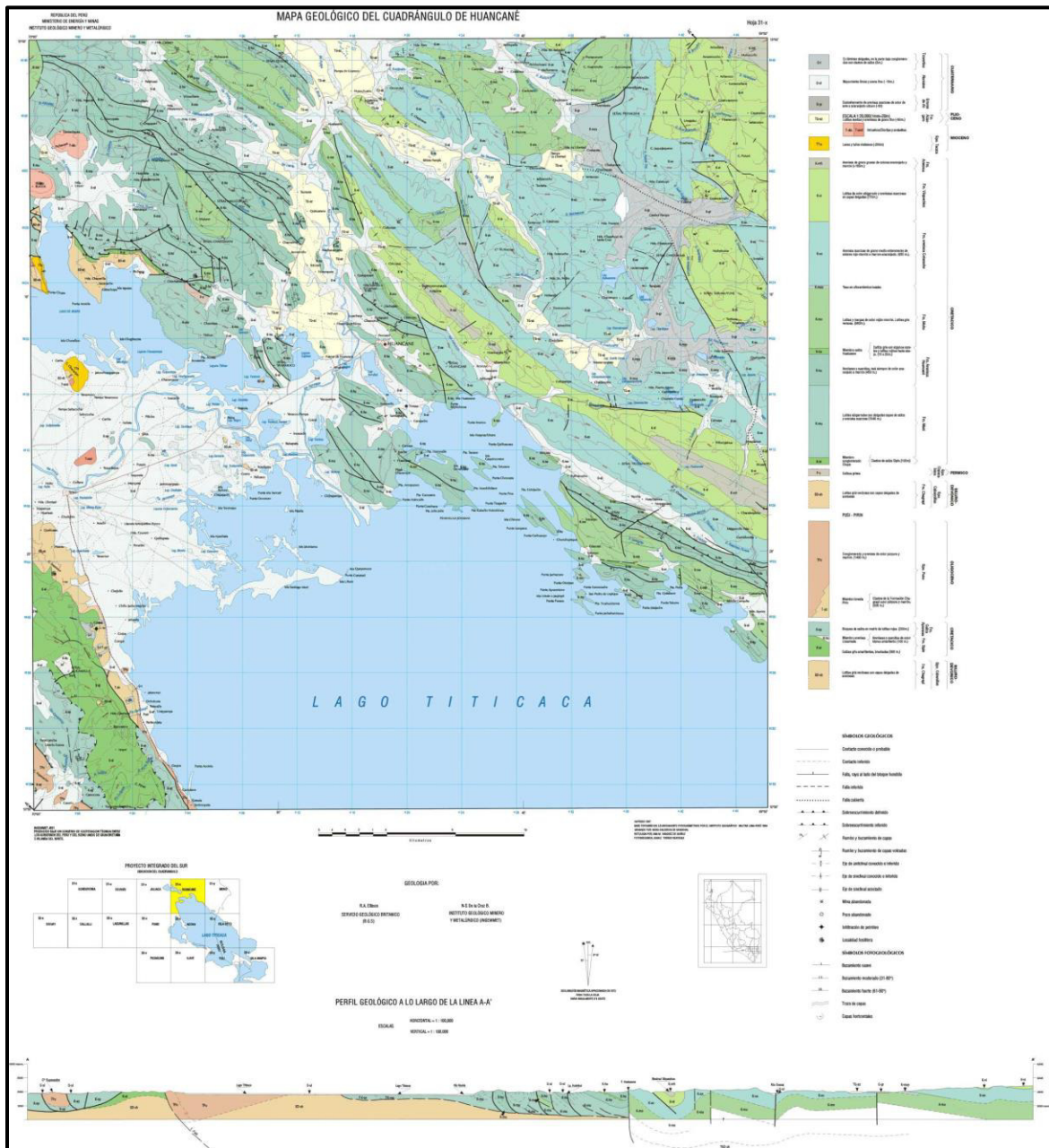
Anexo 06. *Mapa geológico del cuadrángulo de Acora (32–x).*

Anexo 07. *Mapa geológico desarrollado por Acosta (Acosta, 2001).*

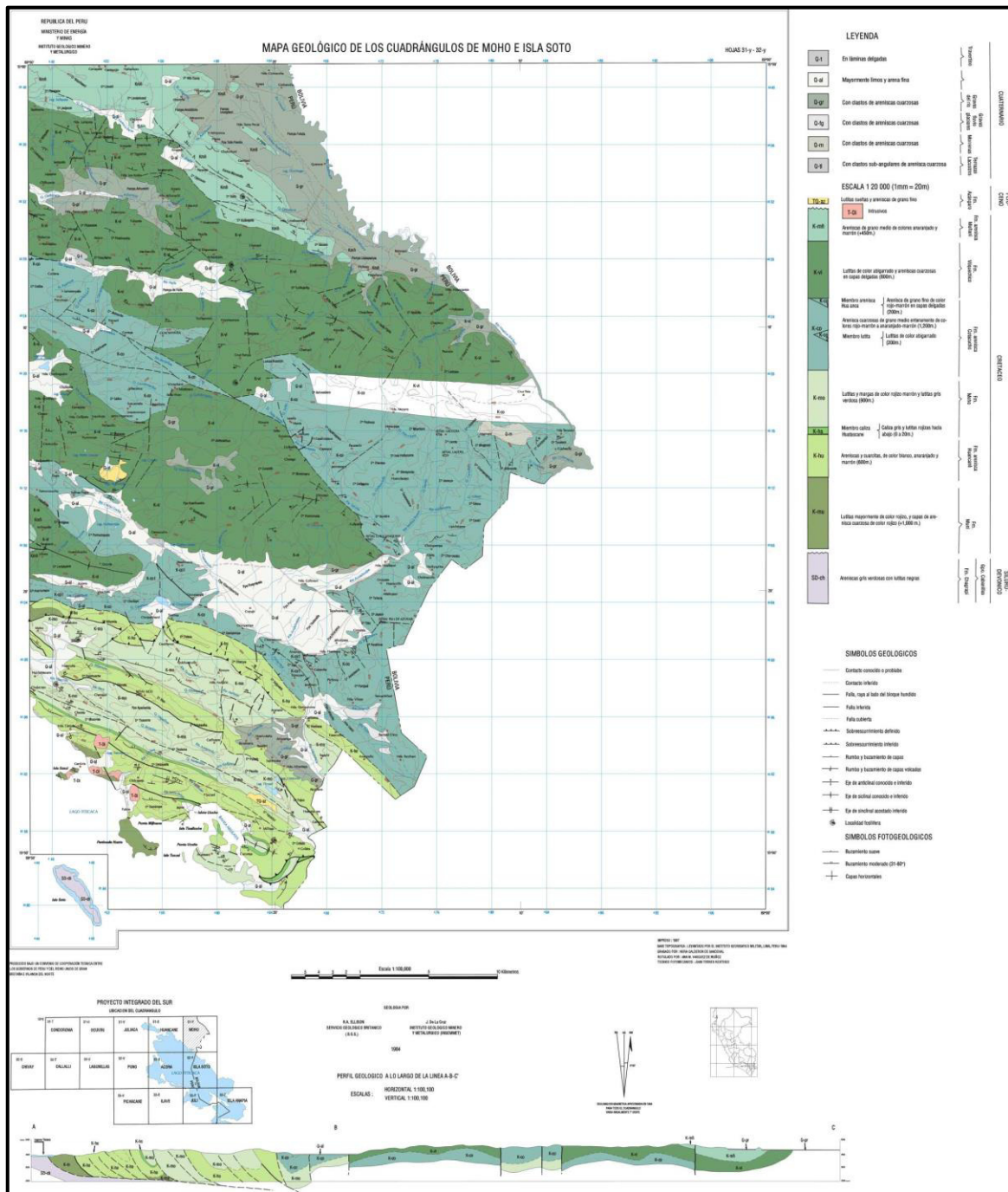
Anexo 08. *Mapa geológico desarrollado por Hermoza (Perupetro S.A., 2008).*



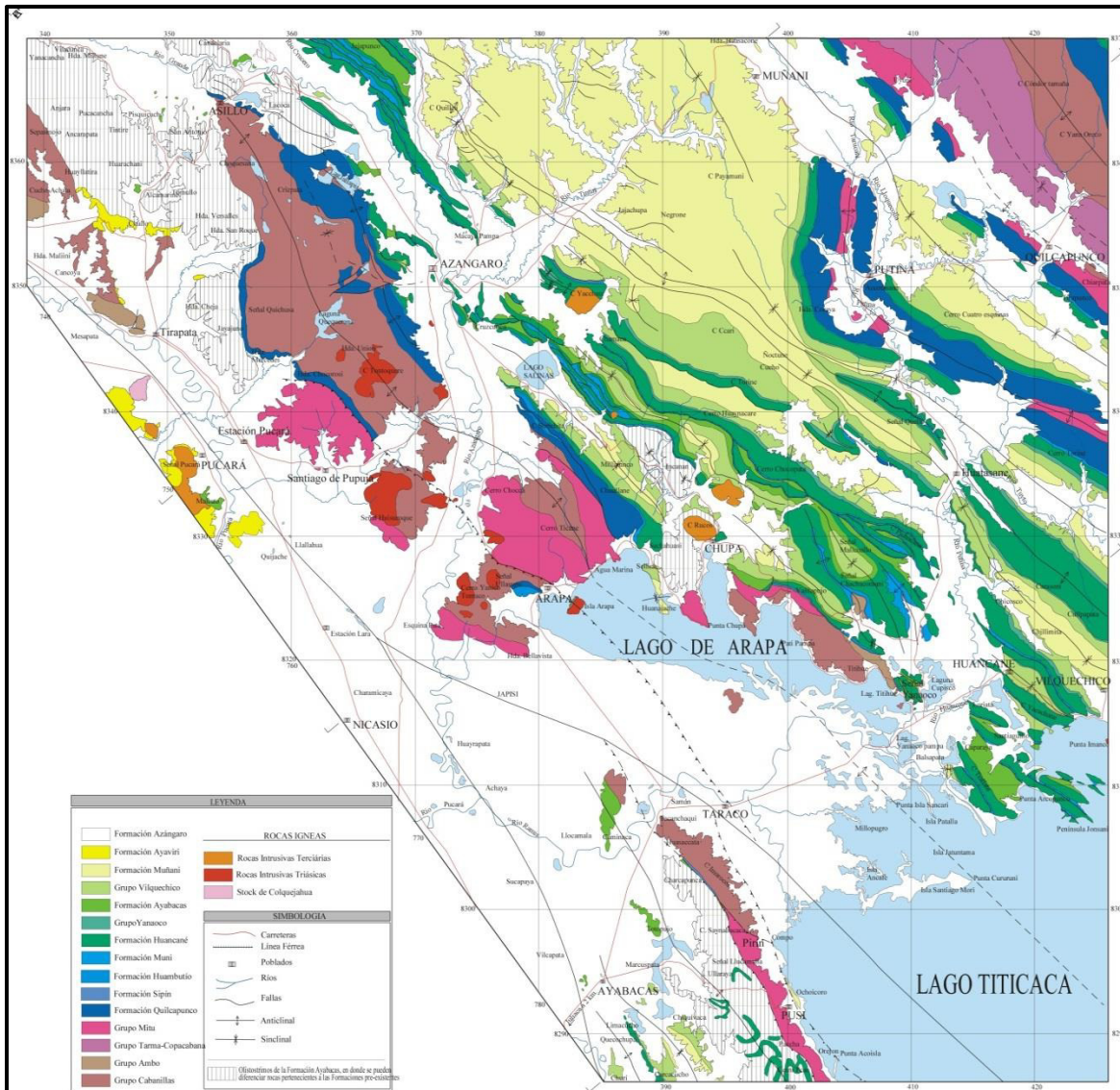




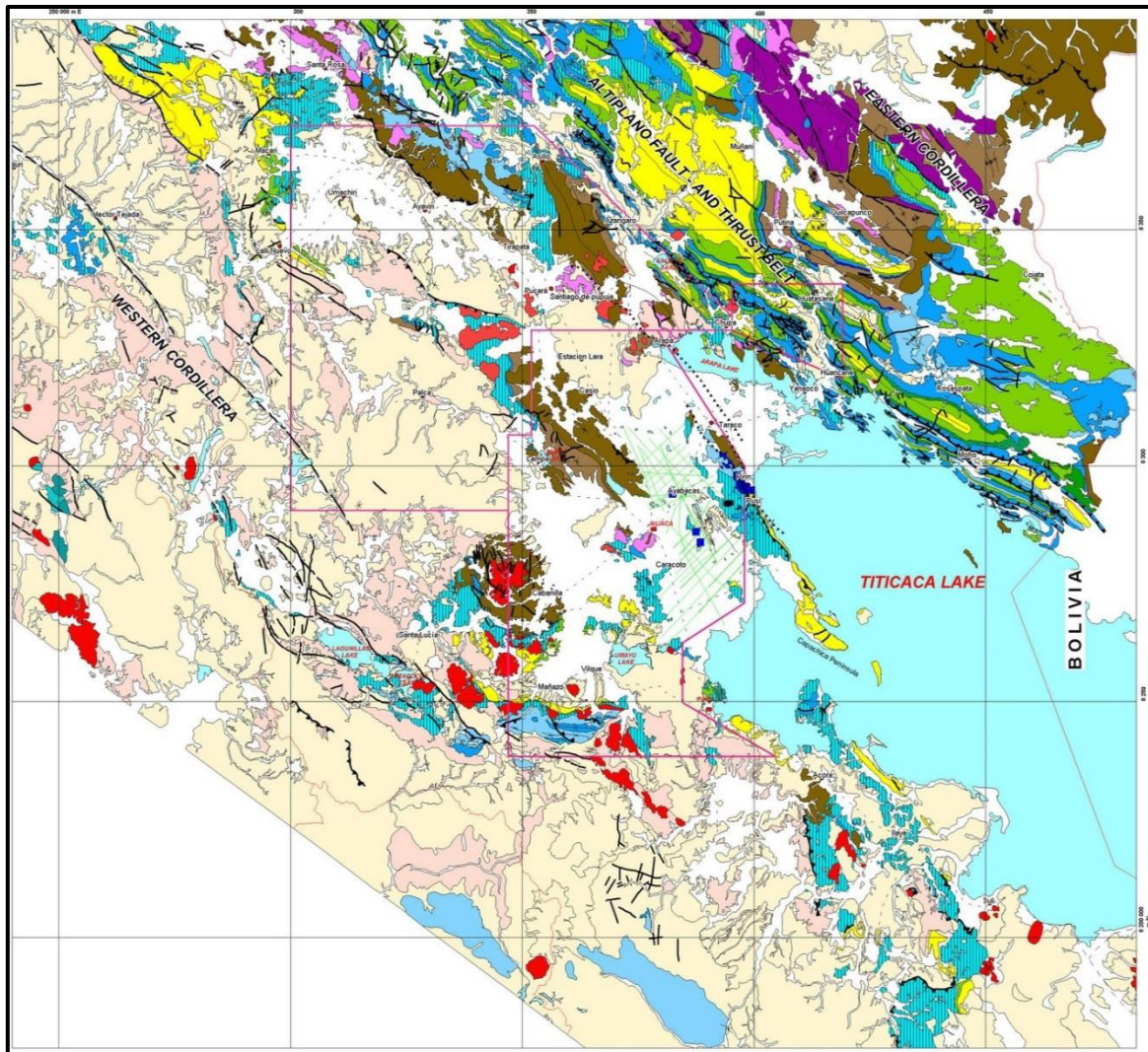
Anexo 03. Mapa geológico del cuadrángulo de Huancané (31-x).



Anexo 04. Mapa geológico del cuadrángulo de Moho e Isla Soto (31-y / 32 y).



Anexo 07. Mapa geológico desarrollado por Acosta (Acosta, 2001).



Anexo 08. Mapa geológico desarrollado por Hermoza (Perupetro S.A., 2008).

8.4. LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1: *Estudios de deformación en la Meseta Andina usando sedimentos y geotermocronología (Bernes y Ehlers, 2009).*

Tabla N° 2: *Estudios de exhumación en la Meseta Andina (Bernes y Ehlers, 2009).*

Tabla N° 3: *Estudios magmáticos y geoquímicos en la Meseta Andina (Bernes y Ehlers, 2009).*

Tabla N° 4: *Datos estructurales y estratigráficos de la campaña de campo YPFB – IRD 2014.*

Letter	Methods	Age in Ma (Location)	Reference
A	Magstrat., seismic, growth strata, bal. sections	9-0 (SA; northernmost Argentina)	Echevarria et al. 2003
B	K/Ar (b, fspar, glss) & Ar/Ar (b, hbl) of volcanoclastics, seismic, growth strata, bal. sections	33-27 & 19-8 (AL: Khenayuni-Uyuni Fault Zone/Lipez basin)	Elger et al. 2005
C	Ar/Ar(hbl, b) of volcanoclastics, stratigraphy, seismic	30-5 (PrC)	Victor et al. 2004
D	Ar/Ar(hbl, b, plag, wr) of volcanoclastics, kinematic data	17-1 (PU)	Marrett et al. 1994
E	Ar/Ar(b) of volcanoclastics, kinematic data	15-0 (PU/AL)	Cladouhos et al. 1994
F	K/Ar(b, wr) of volcanoclastics, kinematic data	29-10 (EC: Tupiza area basins)	Herail et al. 1996
G	Ar/Ar(b, kspar) of volcanoclastics, basin stratigraphy	~40 & ≥25-21 (EC)	Horton 2005
H	Ar/Ar(b) of tuffs, growth strata, stratigraphy	30-14 (EC: Tupiza basins)	Horton 1998
I	Sediment provenance and stratigraphy	~40-23 (AL)	Horton et al. 2002
J	Synthesized biochronology, K/Ar(b, m, kspar, wr), magstrat.	27-19 (AL/EC)	Sempere 1990
K	Sediment provenance, growth strata	33-25 (AL: Luribay & Salla beds)	Gillis et al. 2006
L	Synthesis of structural, stratigraphic, and thermochronologic data	≥45 (WC), 40-20 (EC), 20-0 (IA & SA)	McQuarrie et al. 2005
M	Kinematics linked to sediments, stratigraphy, and thermochronology	40-20 (EC), 20-0 (IA & SA)	McQuarrie 2002
N	Subsurface stratigraphy and correlation, structure, seismic	40-1 (PrC: Atacama basin)	Jordan et al. 2007
O	Stratigraphy, seismic, structure, detrital FT(ap)	6-0 (SP: El Cajon & Campo Arenal)	Mortimer et al. 2007
P	Structure, stratigraphy, growth strata, paleontology	~40 (EC: Calchaqui Valley)	Hongn et al. 2007
Q	K/Ar(b, wr) & Ar/Ar(b, plag), stratigraphy, growth strata, structure	26-8 (PrC: Aroma region)	Farias et al. 2005
R	Structure, stratigraphy, detrital FT(ap), U-Pb(zr))	20-0 (EC: Angastaco basin)	Coutand et al. 2006
S	K/Ar(b, fspar, hbl), stratigraphy	40-25 (EC), 25-7 (AL)	Kennan et al. 1995; Lamb & Hoke 1997
T	Ar/Ar(b, hbl) of volcanoclastics	~38 (PrC)	Hammerschmidt et al. 1992
U	K/Ar & Ar/Ar(b, m, amph, kspar, wr, san, glss, fspar, plag) of volcanoclastics	~38? & 28-0 (PU: Salar de Antofalla area)	Kraemer et al. 1999
V	Structure and synthesized chronostratigraphy	40-0 (WC: SE Atacama margin)	Kuhn 2002

W	Ar/Ar(b, hbl) & K/Ar(b, fspar, glss) of volcanoclastics, kinematic data, bal. sections	40/30-10 (EC: Atocha, Mochara, & Yunchara segments)	Muller et al. 2002
X	Structure, kinematic data, radiometric age data of volcanics, mylonites, mineral alteration	~35 (PrC: Chuquicamata)	Reutter et al. 1996
Y	Detrital FT(ap) & modeling, stratigraphy, sedimentology, provenance, detrital U-Pb(zr)	~40 (PU: Salar de Pastos Grandes)	Carrapa & DeCelles 2008; DeCelles et al. 2007
Z	seismic, wells, stratigraphic correlation, growth strata	60-45 (PrC: Atacama basin)	Arriagada et al. 2006
A1	magstrat., sediment provenance	15-0 (EC/SB: Sierra de Gonzalez)	Reynolds et al. 2000
A2	stratigraphy, seismic, well logs, biostratigraphy	25-0 (SA: foreland deposits)	Uba et al. 2005, 2006; Hulka et al. 2006
A3	stratigraphy, structure, kinematics, U-Pb(zr), age data of volcanics	<3.5-7 (PU/EC: southern Puna margin)	Schoenbohm & Strecker in press
A4	structure, kinematics, Ar/Ar(san, b, kspar, fspar), He(zr, ap)	>~15-0(PrC/WC: southwest Peru)	Schildgen et al. 2009

*Note: ap = apatite; zr = zircon; m = muscovite; b = biotite; fspar = feldspar; kspar = potassium feldspar; hbl = hornblende; wr = whole rock; plag = plagioclase; san = sanidine; glss = glass; K/Ar = $40K/39Ar$; Ar/Ar = $40Ar/39Ar$; FT = fission track; magstrat. = magnetostratigraphy; bal. = balanced.

Tabla N° 1: Estudios de deformación en la Meseta Andina usando sedimentos y geo-termocronología (Bernes y Ehlers, 2009).

Letter	Methods	Age in Ma (Location)	Reference
a	FT(ap) & modeling	32-18 (AL), 40-20 (EC), 18-9 (IA)	Ege et al. 2007
b	FT(ap, zr) & modeling	30-3 (AL), 36-19 & 16-11 (EC), 22-10 (IA), ~15-0 (SA)	Barnes et al. 2008
c	FT(ap) & He(zr) & modeling	18-2 (AL), ~40-25 & ~15-0 (EC), 18-8 (IA), ~15-0 (SA)	Barnes et al. 2006
d	FT(ap, zr) & modeling	18-2 (AL), 45-25 & ~15-0 (EC), >25 & 18-5 (IA)	McQuarrie et al. 2008
e	Ar/Ar(m, b, kspar), FT(ap,zr) & modeling	45-26 & 11-0 (EC: Cordillera Real plutons)	Gillis et al. 2006
f	FT (ap, zr)	45-25 & 15-5 (EC: Zongo & Huayna Potosi plutons)	Benjamin et al. 1987
g	K/Ar(m, b) & Ar/Ar(m, b)	~38 (EC: Zongo-San Gaban zone)	Farrar et al. 1988
h	K/Ar(hbl, b) & FT(ap, zr, sph)	65-50 (PrC), ~38 (WC), ~30 (EC)	Andriessen & Reutter 1994
i	FT(ap) & modeling	50-30 (PrC: Domeyko Cordillera)	Maksaev & Zentilli 1999
j	FT(ap, zr)	~40 & ~15 (PrC: Quebrada Choja)	Damm et al. 1990
k	FT(ap) & modeling	29-24 (PU: Sierra de Calalaste)	Carrapa et al. 2005
l	FT(ap) & modeling	44-35 & 23-15 (EC: Cerro Negro & Alto Grande)	Carrapa et al. 2006
m	FT(ap) & modeling	~55-30 & 23-15 (EC: several ranges)	Deeken et al. 2006
n	FT(ap) & modeling	~60-40 & 10-5 (SP: Sierra Aconquija)	Coughlin et al. 1998
o	FT(ap)	38-29 (EC: Chango Real)	Coutand et al. 2001
p	FT(ap)	13 (PU: Rinconada)	Cladouhos et al. 1994
q	K/Ar(b, m, hbl, kspar)	~39 (EC: Cordillera Real plutons)	McBride et al. 1987
r	FT(ap) & modeling	6-5 (SP: Sierra Aconquija & Cumbres Calchaquies)	Sobel & Strecker 2003
s	FT(ap) & modeling	8-0 (SA)	Scheuber et al. 2006
t	K/Ar & Ar/Ar(m, b, kspar), FT(ap)	~40-20 & ~18 (EC plutons in southern Peru)	Kontak et al. 1990
u	U-Pb, Ar/Ar(m), FT(ap), He(ap)	80-50 & ~30-5 (PU: Salar de Pastos Grandes/Arizaro basins)	Carrapa et al. 2009

*Note: ap = apatite; zr = zircon; m = muscovite; b = biotite; kspar = potassium feldspar; hbl = hornblende; sph = sphene; FT = fission track; K/Ar = $40K/39Ar$; Ar/Ar = $40Ar/39Ar$; He = (U-Th)/He, modeling = inverse thermal modeling &/or multi-diffusion domain modeling.

Tabla N° 2: Estudios de exhumación en la Meseta Andina (Bernes y Ehlers, 2009).

Location	Region (magmatic type)	Age (Ma)	Volume (km ³)	Source	Reference
23-21°S	Bolivia (ignimbrites)	~20-0.01	8000	Crust partial melt	Kussmaul et al. 1977
19.5-22.5°S	Bolivia (andesite, ignimbrites)	24-0	12,000	-	Baker & Francis 1978
5°N-55°S	Entire Andes (intermediate, calc-alkaline)	200-0	-	Mantle	Thorpe et al. 1981
14-8°S	Peru Eastern Cordillera (calc-alkaline)	~100-0	-	-	Carlier et al. 1982
23°S	Purico-Chascon Chile (andesite/rhyolite)	<1.5	-	Crust partial melt	Hawkesworth et al. 1982
20-24°S	Chile/Bolivia/Argentina (andesite/rhyolite)	~60-0	-	Lower/upper crust	Breitkreuz & Zeil 1984
28-16°S	Central Andes (intermediate, ignimbrites)	~2-0	-	Mantle w/ crust contam	Harmon et al. 1984
23-16°S	Central Andes (calc-alkaline)	30-0	-	Crust partial melt	Miller & Harris 1989
24-21°S	Altiplano-Puna Volcanic Complex (ignimbrites)	25-1	10.000	Crust partial melt	De Silva 1989a; 1989b
27-24°S	Puna Argentina (basalt and andesite)	~3-0	-	Lower crust/mantle via delam	Kay & Kay 1993
24°S	Cerro Tuzgle Argentina (ignimbrite, andesite)	2-0	-	Mantle/crust mixing	Coira et al. 1993
22°S	Cerro Chao Chile (dacite, rhyodacite)	<0.1	>48.5	Mafic magma intrusion in crust	De Silva et al. 1994
27-20°S	Central Volcanic Zone (andesite, ignimbrite)	10-0	24710	Crust partial melt, delam?	Francis & Hawkesworth 1994
27-24°S	Puna Altiplano-Puna Volcanic Complex (basalt, andesite)	~3-0	-	>20% crustal melt, delam	Kay et al. 1994
23-15°S	Bolivia (helium emissions)	modern	-	Mantle-derived melts	Hoke et al. 1994
21-18°S	Bolivia (basalt, andesite, dacite)	~23-0	-	Asthen. mantle w/ crust contam	Davidson & de Silva 1995; 1992
27-18°S	Argentina/Bolivia/Chile (basalt to rhyolite)	28-0	-	Mantle & crust partial melt	Allmendinger et al. 1997
26-25°S	Chile (andesite)	20-0	-	Crust partial melt	Trumbull et al. 1999
28-21°S	Argentina/Bolivia/Chile (ignimbrites)	10-1	-	Crust partial melt	Riller et al. 2001
27-25°S	Argentina/Chile (ignimbrites)	26-0	≤700	Magma differentiation	Siebel et al. 2001
34-27°S	Chile/Argentina (basalt, andesite)	27-0	-	Mantle, crustal melt, subduct erosion	Kay & Mpodozis 2002
26-21°S	Chile (calc-alkaline, alkaline)	78-26	-	Mafic underplating of crust	Haschke et al. 2002; 2002b
24°S	Puna Argentina (calc-alkaline)	10-0	-	Mantle & mafic lower crust	Matteini et al. 2002

22-21°S	Chile (calc-alkaline, alkaline)	200-~35	26264	Mafic underplating of crust	Haschke & Gunther 2003
16-13°S	Altiplano Peru (mafic potassic & ultrapotassic)	~3-0	-	Lith mantle blocks, <100 km depth	Carlier et al. 2005
27-19°S	Puna (ignimbrites)	~20-<0.1	>1000	Crust partial melt, <40 km depth	Schilling et al. 2006
28-17°S	Central Andes (basalt to rhyolite)	65-0	-	Crust partial melt, delam	Trumbull et al. 2006
16.5-16°S	Peru Arequipa (ignimbrites)	13-1	>40	Mantle, crust partial melt	Lebti et al. 2006
19-17°S	Bolivia LF/M/EU (mafics, ignimbrites, dacite)	25-2	-	Mafics into crust &/or crustal melt	Barke et al. 2007 and references therein
24-21°S	Argentina/Bolivia/Chile (ignimbrites)	10-1	>10000	Mantle, crust partial melt	De Silva & Gosnold 2007
18°S	Chile Parinacota (andesite, rhyodacite)	0.163-0.020	46	Crust partial melt?	Hora et al. 2007
21-17°S	Bolivia (mafics & helium emissions)	25-0	-	Mantle	Hoke & Lamb 2007
27-25°S	Argentina/Chile (ignimbrites)	25-1	-	Magmatic differentiation	Schnurr et al. 2007

*Note: LF = Los Frailes; M = Morococala; EU = Eucalyptus; contam = contamination; delam = delamination; subduct = subduction; lith = lithosphere; w/ = with; asthen = asthenosphere.

Tabla N° 3: Estudios magmáticos y geoquímicos en la Meseta Andina (Bernes y Ehlers, 2009).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TITICACA

AFT	Latitud	Longitud	Altitud	Muestra	TIPO DE MUESTREO							DOP	DIP	Formación	Descripción (Corroborada con los apuntes de YPFB)	
					AFTA	Zr dating	Vitrinite	R.M.	Glau. dating	Si / S dating	Foram.					Procedencia geotécnica
ALT-001	-15.472422	-69.082311	4145.188897										45	42	Catawi 7	Areniscas deformadas (lumps) de grano fino - medio, griseas con evidencia de masas.
ALT-002	-15.472422	-69.082311	4145.188897										45	42	Permian 7	Areniscas de grano fino - medio, rojas.
ALT-003	-15.464647	-69.081711	4128.246148										50	35	Carbonífero	Discordia Carbonífera - Permian (Base erosiva). Areniscas cuarcitas gris rojas de grano fino.
ALT-004	-15.463667	-69.080579	4127.916504	ALT04	X		X						78	54	Contacto	Areniscas verdosas con evidencia de glauconita.
ALT-005	-15.463667	-69.080579	4127.916504	ALT05-V (x2)			X						78	54	Contacto	Facies finas en el carbonífero - discordancia facies calcáreas en el Permian.
ALT-006	-15.463001	-69.080572	4132.815918	ALT06-V (x2)			X						78	54	Contacto	Facies finas en el carbonífero - discordancia facies calcáreas en el Permian.
ALT-007	-15.394308	-69.081556	3993.268799	ALT07	X		X						45	45	Carbonífero 7	Niveles de diamictitas verdosas, en la base de la secuencia.
ALT-008	-15.394308	-69.081556	3997.310791	ALT08			X						35	45	Carbonífero 7	Contacto entre diamictitas y areniscas de grano medio a grueso. Presencia de niveles de carbón.
ALT-009	-15.391726	-69.080438	4001.413885	ALT09		X							35	45	Permian 7	Areniscas rojas con estratificación cruzada / granoderecencia.
ALT-010	-15.391426	-69.081664	4006.392799	ALT10									32	42	Contacto	Contacto erosivo entre areniscas esculpas (Permian 7) con niveles dolomíticos verdosos (Cretácicos)
ALT-011	-15.390919	-69.080972	3998.121621	ALT11									42	30	Contacto	Dolomitos gris verdosos.
ALT-012	-15.389348	-69.080468	3992.633545	ALT12											Cretácico	Brechas sinifolimentarias, con clastos subangulos de caliza y arenisca. (Ayacucho).
ALT-013	-15.38888	-69.080516	3995.114991	ALT13									X		Chumaca	Nivel calcáreo con presencia de niveles de coquina y fosiles. (Chonta?)
ALT-014	-15.38888	-69.080516	3995.114991	ALT14-26-V			X								Chumaca	Margas variaciones intraverticales a nivel de brecha.
ALT-015	-15.387580	-69.080891	3993.896137	ALT15									X			
ALT-016	-15.386956	-69.080891	4012.008271	ALT16												
ALT-017	-15.386956	-69.080891	4012.008271	ALT17												
ALT-018	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT18-V	X	X							37	30	Tecolote	Brechas marcan en un evento tectónico, con clastos rebajados del carbonífero y cretácico.
ALT-019	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT19-V									35	62	Jurásico	Lutitas de color gris oscuro, con presencia de yeso.
ALT-020	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT20-V									35	62	Canigay 7	Secuencias fluvio - eólicas 7, con base erosiva, evidencia de variaciones en la intensidad de corrientes: presencia de Mudlitas / BASE / Presencia de dunas subacuáticas.
ALT-021	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT21-V									35	70	Canigay 7	Secuencias de areniscas rojas con grano medio y con presencia de lamina de inundación.
ALT-022	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT22-V	X								15	75	Canigay 7	Areniscas curvas colinas, granoderecencia.
ALT-023	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT23-V									45	50	Santa Lucía	Limolitas calcáreas intercaladas con areniscas calcáreas, ambas rojas. Aparece influencia del mar, presencia de mudlitas, punto ubicado cerca al nivel costero.
ALT-024	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT24-V									45	50	Tiahuacana 7	Evidencia de evento transgresivo, presencia de bioturbaciones y presencia de lamina de inundación y niveles calcáreos.
ALT-025	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT25-V									45	50	Tiahuacana 7	Secuencia de las blancas cuarcitas, presencia de yesos. Evidencia de glauconita. Presencia de huella de animal.
ALT-026	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT26-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas curvas, poca presencia de matriz arenosa.
ALT-027	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT27-V									45	50	Tiahuacana 7	Margas multicoloradas intercaladas con niveles finos gardo.
ALT-028	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT28-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-029	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT29-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas con intercalación de limolitas gris verdosas y lutitas gris verdosas con ripas y bioturbación.
ALT-030	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT30-V									45	50	Tiahuacana 7	Evidencia de blancas multicoloradas de niveles calcáreos y pelíticos. Origen.
ALT-031	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT31-V									45	50	Tiahuacana 7	Evidencia de estrato de crecimiento. Estrato 15-18. Se observa bioturbación en las capas.
ALT-032	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT32-V									45	50	Tiahuacana 7	Intercalaciones cuarcitas muy deformadas (2m) con niveles finos generadores (1m) / asociado a roca madre y nivel de despegue.
ALT-033	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT33-V									45	50	Tiahuacana 7	Capas de limolitas grises, con ondulitas y bioturbadas. Hace al topes las lutitas de color gris, presentan estructuras tipo budo, que indican una profundización de la cuenca con
ALT-034	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT34-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas de grano fino, intercaladas con niveles de lutitas y limolitas, que indican un ambiente marino profundo con onlap, posiblemente correlacionables con la formación (Lutita).
ALT-035	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT35-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-036	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT36-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-037	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT37-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-038	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT38-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-039	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT39-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-040	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT40-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-041	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT41-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-042	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT42-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-043	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT43-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-044	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT44-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-045	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT45-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-046	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT46-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-047	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT47-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-048	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT48-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-049	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT49-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-050	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT50-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-051	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT51-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-052	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT52-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-053	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT53-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-054	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT54-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-055	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT55-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-056	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT56-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-057	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT57-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-058	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT58-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-059	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT59-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-060	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT60-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-061	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT61-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-062	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT62-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-063	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT63-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-064	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT64-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-065	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT65-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-066	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT66-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-067	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT67-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-068	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT68-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-069	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT69-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-070	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT70-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-071	-15.456127	-69.084874	4008.610252	ALT71-V									45	50	Tiahuacana 7	Areniscas cuarcitas blanquecinas evidencias de estratos de crecimiento.
ALT-072	-15.456127	-69.														